

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ М. Я. Островерхов
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

на тему: «Моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму»

Виконала:

студентка VI курсу, групи ЕВ-71мп

Малафійчук Людмила Вікторівна _____

Керівник:

Кандидат технічних наук кафедри теоретичної електротехніки,
доцент, Троценко Є. О. _____

Консультант з маркетингу:

Ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к.е.н.,

Царьова Т. О. _____

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студентка _____

Київ – 2018 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1.	A4	141.3111.006.МД	Завдання на дипломний проект	2	
2.	A4	141.3111.006.МД	Пояснювальна записка	135	
3.	A4	141.3111.006.МД	Презентація	13	

				141.3111.006.МД		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Малафійчук Л.В.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Троценко Є.О.				2	137
Консульт.					НТУУ «КПІ» Каф. ТЕВН гр. ЕВ-71мп	
Н/контр.	.					
Зав.каф.	Островерхов М.Я.					

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: Моделювання часткових розрядів при
напрузі змінного струму

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» («Техніка та електрофізика високих напруг»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора

ТОВ «ІНТЕЛТЕХ»

_____ О. А. Філонова

«__» _____ 20__ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М. Я. Островерхов

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Малафійчук Людмилі Вікторівни

1. Тема дисертації Моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму
науковий керівник дисертації Троценко Євгеній Олександрович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018 р. №4107-с
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження Трьох-ємнісна схема заміщення діелектрика з газовим включенням
4. Вихідні дані $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = R_5 = 340 \cdot 10^6$, $900 \cdot 10^6$, $9 \cdot 10^9$, $90 \cdot 10^9 \text{ Ом}$; $C_1 = 50 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$; $C_2 = 2 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$; $C_3 = 6 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$; $V_1 = V_2 = 600 \text{ В}$; опір ключів S_1 та S_2 у розімкненому стані становить $10 \cdot 10^9 \text{ Ом}$, у замкненому 100 Ом .
5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1.Створити схемотехнічну модель діелектрика з газовим включенням при частковому розряді; 2.Створити експериментальний стенд для фізичного дослідження утворення часткових розрядів в ізоляції. 3.Порівняти результати досліджень отриманих у фізичному випробуванні і схемотехнічному моделюванні та визначити можливість такої

моделі якісно відтворювати результати реального дослідження. 4.Порівняти результати кількості утворення часткових розрядів при напрузі постійного та змінного струму однакового номіналу.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Презентація на листах формату А4
7. Орієнтовний перелік публікацій Проценко О.Р., Троценко Є.О., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С. Розробка фільтра верхніх частот для стенду дослідження характеристик часткових розрядів// Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2018 (У друці); Проценко О.Р., Троценко Є.О., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С. Стенд для дослідження характеристик часткових розрядів в ізоляції електроустаткування високої напруги// Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2018 (У друці); Троценко Є.О., Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Олексієнко В.П. Моделювання часткових розрядів при впливі грозових та комутаційних імпульсів напруги// Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2018 (У друці); Троценко Є.О., Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Михалицький В.Л. Дослідження часткових розрядів при впливі напруги змінного та постійного струму// Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2018 (У друці)

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Маркетинг високовольтного обладнання	Царьова Т. О., ст. викладач кафедри промислового маркетингу		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Основні відомості про електропередачі постійного струму	20.09.2018	
2.	Аналіз утворення і розвитку часткових розрядів в ізоляції електрообладнання високої напруги	28.09.2018	
3.	Схемотехнічне моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму	08.10.2018	
4.	Розробка стартап-проекту	21.11.2018	
5.	Підготовка графічної частини	01.12.2018	

Студент

(підпис)

Л.В. Малафійчук
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

Є.О. Троценко
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 137, рисунків – 54; таблиць – 27, посилань – 60 та графічну частину на листах формату А4.

У магістерській дисертації виконано вибір основної схеми моделювання – трьох-ємнісної схеми заміщення діелектрика з газовим включенням для дослідження часткових розрядів при напрузі постійного струму.

Виконано схемотехнічне моделювання часткових розрядів при напрузі змінного та постійного струму за допомогою програмного забезпечення Micro-Cap Evaluation Version а також моделювання нормальних режимів роботи уніполярної передачі постійного струму при різних типах заземлення.

В магістерській дисертації проведено розробку спеціального лабораторного стенду для фізичного дослідження часткових розрядів при постійній та змінній напругах.

Проведено аналіз результатів схемотехнічного та математичного досліджень при напрузі постійного струму.

Для впровадження даної установки на ринок розроблено стартап-проект.

Запропоновані моделі можуть бути використані для дослідження якості ізоляційних конструкцій електротехнічного обладнання, а результати дослідження – для компромісного вибору виду напруги за цільових та необхідних умов її передачі.

Ключові слова: постійний струм, постійна напруга, змінна напруга, частковий розряд, трьох-ємнісна схема, передача постійного струму, схемотехнічне моделювання, лабораторний стенд, Micro-Cap Evaluation Version

SUMMARY

Diploma project consists of: pages – 137, pictures – 54; tables – 27, references – 60 and graphic part to the sheets of A4 format.

In the master's thesis the basic simulation scheme – a three-capacitive scheme for replacing an insulator with a gas inclusion for the study of partial discharges at a DC voltage was chose.

Schematic modeling of partial discharges at the voltage of alternating and direct current with the help of Micro Cap Evaluation Version software and simulation of normal modes of unipolar DC transmission at different types of grounding was performed.

In the master's dissertation the development of a special laboratory stand for the physical study of partial discharges at constant and alternating voltages was carried out.

The analysis of the results of circuit engineering and mathematical researches at a voltage of a direct current was carried out.

To implement this installation on the market developed a startup project.

The proposed models can be used to study the quality of insulation structures of electrical equipment, and the results of the study - to compromise of the choosing of type of voltage at the purposed and necessary conditions for its transmission.

Keywords: direct current, direct voltage, alternating voltage, partial discharge, three-capacitive scheme, direct current transfer, circuit design, laboratory stand, Micro-Cap Evaluation Version

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ	12
ВСТУП	16
1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	21
1.1. Область застосування електропередач постійного струму	21
1.2. Розвиток електропередач постійного струму в країнах Європейського Союзу	27
1.2.1. Перші кроки до будівництва глобальної супермережі	29
1.3. Основні схеми електропередач постійного струму	35
1.4. Схемотехнічне моделювання уніполярної передачі постійного струму	53
1.5. Висновки до розділу 1	60
2. УТВОРЕННЯ І РОЗВИТОК ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ В ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВИСОКОЇ НАПРУГИ	63
2.1. Механізм утворення часткових розрядів при напрузі змінного струму	63
2.2. Механізм утворення часткових розрядів при напрузі постійного струму	65
2.3. Огляд перших публікацій з дослідження часткових розрядів при напрузі постійного струму	70
2.4. Висновки до розділу 2	72
3. СХЕМОТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ ПРИ НАПРУЗІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	74

3.1. Вибір способу моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму	74
3.2. Схемотехнічне моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму за допомогою Micro-Cap Evaluation Version	81
3.2.1. Моделювання часткових розрядів при ідеальній напрузі постійного струму.	81
3.2.2. Моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму з застосуванням однопівперіодного випрямляча	89
3.3. Експериментальне дослідження часткових розрядів на постійному струмі в лабораторіях кафедри теоретичної електротехніки	98
3.3.1. Стенд дослідження характеристик часткових розрядів ізоляції високовольного устаткування	98
3.3.2. Утворення часткових розрядів при постійній напрузі зволоженого зразку.....	101
3.3.3. Утворення часткових розрядів при постійній напрузі сухого зразку.....	102
3.4. Висновки по розділу 3	106
4. СТАРТАП-ПРОЕКТ	109
4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)	109
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту	110
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	111
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	118
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	120
4.6. Висновки до розділу 4	123

	11
ВИСНОВКИ	124
Додаток А.....	128
ЛІТЕРАТУРА.....	132

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ

$\frac{di}{dt}$ – зміна швидкості струму в процесі комутації

A – полюс подання напруги

B – полюс подання протилежної він A напруги

C₁ – ємність діелектрика, без ділянки з газовим включенням

C₂ – ємність ділянки діелектрика, включеного послідовно з газовим включенням;

C₃ – ємність газового включення

C₄ –

C₅ – ємність ділянки діелектрика, включеного послідовно з газовим включенням

C₆ – ємність газового включення

C_a – ємність діелектрика без ділянки з газовим включенням

C_b – ємність ділянки діелектрика, включеного послідовно з газовим включенням

C_B – ємність тазового включення

D₁ – діод

E₁ – функціональне джерело напруги

E₂ – джерело напруги, що має як основну частоту, так і представляє суму гармонік напруги

E_B – ЕРС випрямляча

E_i – протиЕРС інвертора

f – частота

I_d – струм в лінії

I_C – струм компенсуючого конденсатора

I_{cp} – середнім значенням струму вентиля

L_{ct} – індуктивність реатора, включеного в полюс перетворювального моста

n – кількість часткових розрядів

n_- – кількість часткових розрядів при напрузі постійного струму
 n_{\sim} – кількість часткових розрядів при напрузі змінного струму
 $n_{\sim\min}$ – мінімальна кількість часткових розрядів при напрузі змінного струму
 $N_{\text{с}}$ – номер імпульсу
 $P_{\text{д1}}$ – потужність, що віддається випрямлячем
 $P_{\text{д2}}$ – потужність, що приймається інвертором
 $P_{\text{дМ}}$ – потужність перетворювального моста
 Q – добротність
 q_j – заряд розряду
 $q_{\text{чр}}$ – заряд часткового розряду
 R – опір каналу розряду, в якому розсіюється енергія
 R_1 – внутрішній опір джерела напруги
 R_2 – опір витоку діелектрика
 R_4 – внутрішній опір джерела напруги
 R_5 – опір витоку діелектрика
 r_1 – внутрішній опір інвертора
 R_6 – опір витоку діелектрика
 $r_{\text{в}}$ – внутрішній опір випрямляча
 $R_{\text{в}}$ – опір газового включення
 r_3 – опір землі
 $R_{\text{л}}$ – опір лінії постійного струму (омічний опір лінії)
 S_1, S_2 – ключі, керовані напругою з гістерезисом.
 SW_1, SW_2 – ключі, керовані напругою
 T – швидкість зміни напруги на проміжку утворення розряду
 $T_{\text{доп}}$ – гранично допустимі температури в умовах експлуатації
 t_1 – час виникнення розряду
 t_2 – час виникнення другого часткового розряду
 $t_{C1\max}$ – час максимального значення напруги на конденсаторі C_1

t_{C1min} – час мінімального значення напруги на конденсаторі C_1

$t_{кр}$ – критична довжина лінії, при якій витрати на спорудження ЛЕП постійного і змінного струму стають однаковими

$t_{пр}$ – час пробою газового включення

$u(t_1)$ – миттєва напруга від часу виникнення розряду

U_0 – номінальна напруга

U_1 – напруга початку утворення розряду при $t = 0$

u_B – миттєве значення напруги повітряного включення

u_{Bmax} – миттєве максимальне значення напруги повітряного включення

U_{C1max} – максимальне значення напруги на конденсаторі C_1

U_{C1min} – мінімальне значення напруги на конденсаторі C_1

$U_{d(п-з)}$ – напруга між перетворювальним мостом а землею

U_{d1} – напруга конвертора

U_{d2} – напруга інвертора

U_{dM} – напруга перетворювального моста

$U_{в max}$ – максимальною напругою вентиля

U_r – напруга гасіння розряду

$u_{Гmax}$ – миттєва максимальна напруга гасіння розряду

$u_{пр}$ – напруга пробою

$U_{пр}$ – напруга пробою газового включення

$u_{прmax}$ – миттєва максимальна напруга пробою

$U_{чр}$ – напруга часткового розряду

V_1, V_2 – джерела опорної напруги

$W_{чр}$ – енергія часткового роряду

X_1, X_2 – компаратори напруги з гістерезисом (для рис. 4,б)

X_1, X_2 – тригери Шмітта (для рис. 4,а)

Δt – інтервал часу між частковими розрядами

ИР - розрядник, що імітує пробою газового включення

Імп. – порядок імпульсу

П₁ – перетворювальний пункт (зазвичай конвертор)

П₂ – перетворювальний пункт (зазвичай інвертор)

DC (від. англ. Direct Current) – постійний струм

AC (від англ. Alternating Current) – змінний струм

HVDC (від англ. High Voltage Direct Current) – висока напруга постійного струму

UHVDC (від англ. Ultra High Voltage Direct Current) – ультра висока напруга постійного струму

HVAC – (від англ. High Voltage Alternating Current) – висока напруга змінного струму

ППС – передача постійного струму

ВПС – вставка постійного струму

ФКП – фільтрокомпенсуючий пристрій

ЧР – частковий розряд

ПРРП – пристрої регулювання реактивної потужності

ЛЕП – лінія електропередачі

АЕ- акустична емісія

ВСТУП

Часткові розряди в ізоляції електрообладнання високої напруги поступово приводять до погіршення властивостей ізоляції, її фізичного руйнування і, в кінцевому результаті, до електричного пробоя. Розвиток електропередач постійного струму на даний час відбувається в усьому світі, зокрема і в Європі. Для передачі електричної енергії на значні відстані від великих гідро- і вітрових електростанцій в електропередачах постійного струму широко використовуються кабельні лінії. У зв'язку з цим відновився інтерес до явища часткових розрядів в ізоляції кабельних ліній електропередач постійного струму. Література з тематики часткових розрядів, яка ще декілька років назад могла вважатися базовою, відповіді на нові питання дати не може.

Актуальність теми. Тривалість роботи високовольтного обладнання електромережі в першу чергу залежить від її надійності. В процесі експлуатації на ізоляцію впливає робоча напруга чи перенапруги різних типів. В ослаблених ділянках ізоляції виникають часткові розряди, що і являються основною причиною погіршення її фізичних та хімічних властивостей, що у свою чергу прискорює старіння ізоляції або в кінцевому результаті її пробій.

В останні роки, із зростанням потреб в енергозабезпеченні мегаполісів, що швидко розвиваються чи потужної промисловості зросла потреба у надійному передаванні великої кількості потужності на дальні дистанції. Таким чином й почався період відродження технологій постійного струму у світі, зокрема і у Європі. Передача постійного струму вимагає наявності потужного високовольтного перетворювального обладнання, а також ліній електропередач, у основному кабельних.

Вимірювання характеристик часткових розрядів – це один із основних методів неруйнівного контролю ізоляції високовольтного обладнання а також оцінки його стану. Оскільки не в кожній лабораторії є обладнання для

вимірювання часткових розрядів на постійному струмі, побудова схемотехнічної моделі, яка дасть якісне та кількісне уявлення про систему вимірювання характеристик ЧР є *актуальним завданням*.

Мета роботи. Аналіз процесу часткового розряду в ізоляції при напрузі постійного струму, виконання схемотехнічного моделювання за допомогою програмного забезпечення Micro-Cap Evaluation Version, розробка стенду для дослідження часткових розрядів при різних напругах, а також порівняння результатів досліджень отриманих фізично та віртуально.

1. Основні відомості про передачі постійного струму;
2. Утворення і розвиток часткових розрядів в ізоляції електрообладнання високої напруги
3. Схемотехнічне моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму
4. Стартап-проект

Завдання.

1. Створити схемотехнічну модель діелектрика з газовим включенням при частковому розряді.
2. Створити експериментальний стенд для фізичного дослідження утворення часткових розрядів в ізоляції.
3. Порівняти результати досліджень отриманих у фізичному випробуванні і схемотехнічному моделюванні та визначити можливість такої моделі якісно відтворювати результати реального дослідження.
4. Порівняти результати кількості утворення часткових розрядів при напрузі постійного та змінного струму однакового номіналу.

Об'єкт дослідження. Процеси часткових розрядів, що моделюються при використанні трьох-ємнісної схеми заміщення діелектрика з газовим включенням при впливі напруги постійного та змінного струму, а також міжелектродний

проміжок спеціально створеного стенду для дослідження часткових розрядів при різних формах прикладеної напруги.

Предмет дослідження. Трьох-смнісна схема заміщення для моделювання ізоляції з наявним в ній газовим включенням.

Методи досліджень. Для проведення дослідження були використані методи схемотехнічного моделювання за допомогою програмного забезпечення, фізична інтерпретація моделювання а також математичний метод розрахунку характеристик часткових розрядів.

У роботі використані додатково методи високовольтних випробувальних установок, техніки та електрофізики високих напруг, електричної частини станцій та підстанцій, приймальних та експлуатаційних випробувань електроустаткування та обчислення на ПЕОМ задач з ТЕВН.

Наукова новизна. Трьох-смнісна схема заміщення ізоляції з наявним в ній повітряним включенням набула широкого використання для дослідження часткових розрядів при змінній напрузі. Завдяки деяким модифікаціям цієї схеми стало можливим визначення параметрів ЧР при напрузі постійного струму. В подальшому дана схема була використана для розробки високовольтного дослідного стенду.

Практична цінність матеріалів роботи. Схема даної установки фізичного моделювання має більшу чутливість до визначення характеристик часткових розрядів за рахунок використання високочастотного фільтру на основі фільтру Батерворта 4-го порядку та підсилювача сигналів часткових розрядів УЗ-29 у поєднанні.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, що висвітлені у роботі, отримані у співавторстві з науковим керівником.

Основні результати дослідження.

Для передачі постійного струму в основному використовуються уніполярну і біполярну схему передачі. Було зроблено аналіз цих видів схем та змодельовано

уніполярну передачі постійного струму для порівняння її робочих характеристик при різних видах заземлення. Дослідився механізм утворення часткових розрядів у трьох-ємнісній схемі заміщення діелектрика з газовим включенням при напрузі змінного та постійного струму та проведений математичний аналіз його характеристик. Дослідження обраної моделі проводилося для двох видів струму: ідеального та конвертованого, що моделює реальний режим роботи лінії постійного струму. Наряду із фізичним моделюванням часткових розрядів при різних формах прикладеної напруги, були проведені математичний аналіз параметрів утворення ЧР та їх схемотехнічне моделювання за допомогою програмного забезпечення Micro-Cap Evaluation Version. Для фізичного експерименту був зібраний спеціальний лабораторний стенд на кафедрі Теоретичної електротехніки.

Апробація результатів. При підготовці магістерської дисертації в рамках науково-дослідної роботи було підготовлено та опубліковано дві наукові статті [12, 13]. Крім цього в грудні 2018 року підготовлено та зроблено чотири доповіді: «Моделювання часткових розрядів при впливі грозових та комутаційних імпульсів напруги» (Троценко Є.О., Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Олексієнко В.П.), «Дослідження часткових розрядів при впливі напруги змінного та постійного струму» (Троценко Є.О., Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Михалицький В.Л.), «Стенд для дослідження характеристик часткових розрядів в ізоляції електроустаткування високої напруги» (Троценко Є.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С.) та «Розробка фільтра верхніх частот для стенду дослідження характеристик часткових розрядів» (Троценко Є.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С.).

Публікації. Дані доповіді будуть опубліковані в Міжнародному науково-технічному журналі молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми

електроенерготехніки та автоматики» у 2019 році (сайт журналу <http://jour.fea.kpi.ua/issue/archive>).

1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1. Область застосування електропередач постійного струму

На сьогоднішній час для вироблення електричної енергії, її передачі на відстань, розподілення і споживання в основному використовується змінний струм. Це пояснюється на самперед можливістю змінного струму до трансформації, тобто зміні напруги за допомогою досить простих апаратів (трансформаторів), а також тим, що електродвигуни змінного струму своєю конструкцією значно простіші і, відповідно, надійніші електродвигунів постійного струму. Крім того, велике значення має і те, що значно легше створити вимикач змінного струму, які будуть здатні вмикати струми в десятки тисяч ампер при напрузі в сотні кіловольт. Завдяки цьому змінний струм використовується всюди, за винятком деяких промислових виробництв та електричного транспорту. І тим не менш, в останні десятиліття енергетики різних країн все частіше звертаються до постійного струму для вирішення ряду задач, в тому числі і задач, пов'язаних з передачею електроенергії на великі відстані.

Для відповіді на це запитання, з якою метою це робиться, складемо характеристики ліній змінного і постійного струму.

Дві лінії мають однотипні параметри – активний опір проводів, індуктивність і ємність. Активний опір проводів визначає втрати потужності і енергії в лінії, і відповідно, її ККД, а індуктивність і ємність – електромагнітні процеси в лінії, пов'язані з передачею електроенергії. В лінії змінного струму ці процеси носять хвильовий характер, що і визначає основні характеристики цієї лінії. В лінії постійного струму в усталених режимах хвильові процеси відсутні.

Звичайно, генерація, передача, розподіл та споживання електроенергії здійснюються на змінному струмі. Постійний струм використовується лише для вирішення порівняно невеликого, але досить важливого кола задач, що

пояснюється специфічними властивостями постійного струму і характером електромагнітних процесів, пов'язаних з передачею потужності.

В наш час всі відомі об'єкти постійного струму діляться на дві групи. До першої групи відносяться лінії електропередачі постійного струму (ППС), по яким електрична енергія передається на деяку відстань. Невід'ємною частиною таких електропередач є повітряна чи кабельна лінія постійного струму. До другої групи відносяться так звані вставки постійного струму (ВПС), де лінія постійного струму відсутня. Вся ланка постійного струму знаходиться в межах підстанції, до якої підходять лінії змінного струму від зв'язуючих систем.

Структурні схеми ППС та ВПС приведені на рисунку 1. На кінцях електропередачі ввімкнені перетворювачі Π_1 та Π_2 , які перетворюють змінний струм в постійний на відправному пункті та постійний струм в змінний на приймальному пункті. Пристрій, що перетворює змінний струм в постійний струм, називається випрямляч або конвертор, а постійний в змінний – інвертор.

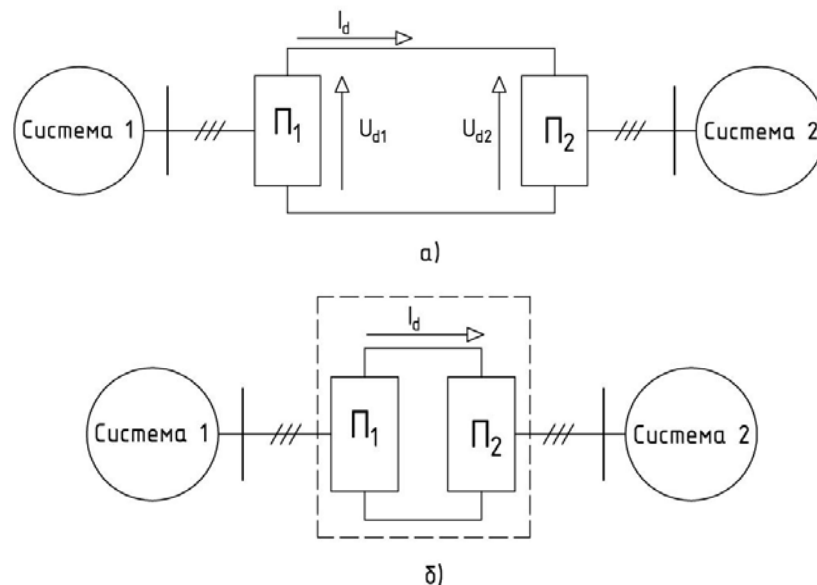


Рис.1. Структурні схеми електропередачі постійного струму (а) та вставки постійного струму (б)

Вставка постійного струму може розташовуватись чи поблизу однієї із зв'язних систем, чи на одній з проміжних підстанцій електропередачі змінного

струму, яка зв'язує ці дві системи. В останньому випадку лінії, що підходять з різних сторін до ВПС, можуть мати різну напругу чи різну частоту зв'язних систем. Лінії змінного струму та вставки постійного струму, що використовуються для зв'язку двох несинхронного працюючих систем чи систем різної частоти, мають перевагу, яка заключається в тому, що з їхньої допомогою легше забезпечити живлення споживачів, які розташовані по трасі лінії.

Процес передачі електричної енергії по лініям постійного струму носить принципово інший характер, тому що в ній відсутні хвильові процеси. Завдяки цьому лінія постійного струму володіє якісно іншими властивостями. Оскільки частота в даному випадку рівна нулю, то повздовжній індуктивний опір та її поперечна ємнісна провідність також рівні нулю. Якщо пропускна можливість лінії змінного струму, визначається головним чином електромагнітними властивостями, залежить від її довжини та зменшується із збільшеннями останнього, то в лінії постійного струму така можливість відсутня. Саме тому лінія постійного струму розглядається як один із засобів передачі великих потужностей на великі відстані, коли задача не вирішується за допомогою лінії змінного струму чи коли передача змінного струму виявляється менш економічним рішенням.

В лінії постійного струму відсутня зарядна потужність, характерна для ліній змінного струму. Ця обставина має велике значення для кабельних ліній. В кабельних ліній змінного струму зарядна потужність обмежує їх довжину і корисну потужність, що передається, через нагрівання струмоведучих жил кабелю. В кабельних лініях постійного струму це обмеження знімається, що дозволяє робити лінії досить довгими.

Кабельні лінії постійного струму високої напруги і з потужністю в сотні мегават можуть застосовуватися і для введення потужності в центри великих міст і промислових районів, які займають великі території і споживають досить значні потужності. Спорудження великих електростанцій в центральній частині міста

недоцільно з багатьох причин, в тому числі і екологічних. Тому потужності потрібно вводити в центр міста з його околиць або з передмість, де можливо спорудження підстанцій надвисокої напруги, куди передається енергія від віддалених електростанцій, а потім цю потужність передавати в центр міста по кабельних лініях, так званим глибоким введів.

Глибоке введення потужності в місто по кабелях постійного струму має перевагу, що полягає в тому, що при цьому не збільшуються струми коротких замикань і виключаються заходи щодо їх обмеження або заміні комутаційних апаратів, як це було б при використанні введення на змінному струмі. Однак при цьому слід мати на увазі, що таке рішення потребує спорудження перетворювальних підстанцій на початку і кінці лінії.

Оскільки як в ППС, так і в ВПС потужність передається через ланку постійного струму, то здійснюється повна розв'язка по частоті. З їх допомогою можна пов'язувати системи, що працюють з різною номінальною частотою або з однієї номінальної частотою, але несинхронно, а також системи з однієї номінальної частотою, в яких застосовуються різні закони її регулювання чи є різні вимоги до її підтримки. У всіх випадках можна забезпечити передачу потужності в двох напрямках, тобто оборотність роботи передачі.

Важливо відзначити при цьому, що перетворювачі ППС і ВПС оснащені досить швидкодіючої системою автоматичного регулювання. Тому обурення, що виникли в результаті аварії в одній з пов'язують систем, не передаються в іншу, як це було б при їх зв'язку по лініях змінного струму.

Таким чином, ППС і ВПС можуть застосовуватися для вирішення досить широкого кола завдань електроенергетики, а саме:

1. Передача енергії від віддалених електростанцій;
2. Зв'язок двох або декількох систем, що працюють несинхронно або з різною номінальною частотою;
3. Перетин великих водних просторів за допомогою кабельних ліній;

4. Глибокі кабельні вводи в міста і промислові центри; міждержавні зв'язки;

Слід зазначити, що поряд з перерахованими вище перевагами електропередачі і вставки постійного струму традиційного виконання мають ряд недоліків, як, втім, і будь-яке інше інженерне рішення. До їх числа відносяться:

1. Велике споживання реактивної потужності перетворювальними пристроями, що становить 0,5-0,6 кВАр/кВт на кожній перетворювальній підстанції, де для потужних ППС і ВПС це вимагає установки додаткових компенсуючих пристроїв і відповідно додаткових витрат;

2. Споживання перетворювачами з мережі або генерація в мережу струму несинусоїдної форми, а саме струму, що містить вищі гармоніки. При великій потужності перетворювачів струми вищих гармонік мають великі значення і можуть негативно впливати на сусідні системи. Тому на перетворювальних підстанціях вживають заходів щодо їх компенсації, що також вимагає додаткових витрат.

Слід зазначити, що нові типи перетворювачів, розроблені останнім часом, значною мірою позбавлені цих недоліків, проте в силу ряду причин вони ще не отримали широкого застосування.

В результаті перетворюючі підстанції електропередач і вставок постійного струму мають істотно більшу вартість, ніж підстанції змінного струму при рівній потужності. Питома вартість потужної підстанції постійного струму становить 55-75 дол/кВт проти 20-40 дол/кВт для змінного струму.

Вартість повітряної лінії електропередачі визначається вартістю проводів, опор, їх фундаментів, лінійної ізоляції, умовами прокладки траси, монтажу. За сучасними даними вартість 1 км лінії постійного струму приблизно на 20-25% менше вартості 1 км лінії змінного струму. Оскільки витрати на лінію визначаються її довжиною, то в результаті для протяжних ліній постійного струму економія на їх спорудженні компенсує надлишкові витрати на спорудження перетворювальних підстанцій. При деякій довжині лінії, так званої

критичної $t_{кр}$ витрати на спорудження електропередачі постійного і змінного струму стають однаковими (рис. 2). При довжині лінії понад критичної доцільно споруджувати лінію постійного струму, при довжині лінії менш критичною - змінного струму.

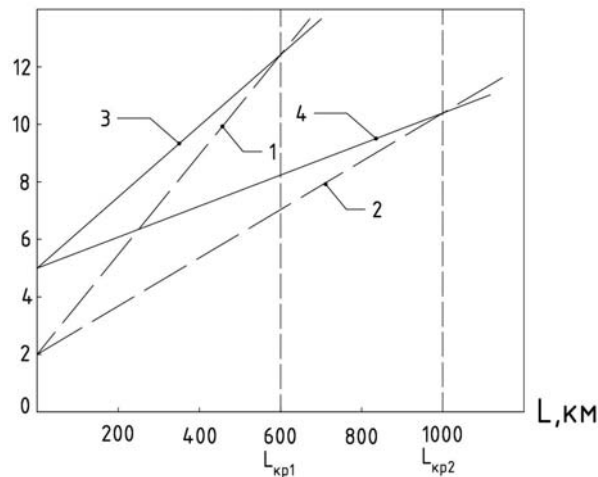


Рис. 2. Капітальні вкладення в електропередачі змінного (штрихова лінія) і постійного струму (суцільна лінія) однаковою пропускної спроможності
1, 3 - важкі умови проходження траси, 2, 4 - благополучні умови проходження траси

Природно, що значення критичної довжини лінії визначається співвідношенням цін на апаратуру та обладнання перетворювальних підстанцій, а також на дроти, ізолятори, опори ліній. Крім того, значення критичної довжини лінії визначається умовами проходження траси. При важких умовах ця довжина менше, ніж при сприятливих умовах.

Вибір роду струму - постійного чи змінного, а також номінальної напруги при виборі варіанту споруди електропередачі виробляється на підставі детальних техніко-економічних зіставлень. У них враховується цілий ряд факторів, таких як капітальні вкладення в лінії і підстанції, щорічні витрати на експлуатацію та ремонт ліній і підстанцій, вартість втрат енергії на нагрів проводів і корону та ін. Одним з важливих показників є собівартість електроенергії на приймальному

кінці електропередачі. Необхідно також враховувати і системні аспекти, які виникнуть при спорудженні тієї чи іншої передачі: питання стійкості генераторів віддаленої станції або пов'язують систем, перспективи розвитку системи та багато ін. При виборі роду струму слід враховувати стабілізуючий ефект електропередач або вставок постійного струму, про що говорилося вище.

1.2. Розвиток електропередач постійного струму в країнах Європейського Союзу

Вигляд другої промислової революції (Second Industrial Revolution, SIR), докорінно, що змінив світ в кінці XIX ст. багато в чому визначився стрімким розвитком електрифікації з широким впровадженням індивідуального електроприводу і електричного освітлення.

Із розвитком електроспоживання завжди хвилювало питання створення протяжних електромереж з ефективною передачею енергії на великі відстані. В рамках технології постійного струму того часу відносно прості вирішення цього завдання типу біполярної трьохпровідної системи передачі (Т. Едісон і Дж. Гопкінсон, 1882 г.) або більш складної п'ятипровідної системи (В. Сіменс), дозволяли зменшити втрати в лінії передачі і довести довжину ефективної передачі до 1,2-2 км. Це цілком підходило для невеликих проєктів електрифікації з близько розташованими до споживача електростанціями малої і середньої потужності. Завдання передачі електроенергії постійного струму на великі відстані була вирішена французьким інженером Рене Тюрі шляхом послідовного включення ряду електрогенераторів на стороні передачі і, відповідно, ряду електромашинних перетворювачів на стороні прийому.

Освоений в цей же час в рамках технології змінного струму спосіб трансформаторного перетворення змінної напруги, виявився істотно простіше і дешевше. І, тим не менше, ряд систем Тюрі залишався в експлуатації аж до 1930-х років. Минуло понад 100 років з часу закінчення основних битв «війни струмів»

і ось, в 2007 р відбулася офіційна церемонія її завершення при ліквідації компанією Consolidated Edison останньої лінії електропостачання постійного струму.

Якісний стрибок у створенні ліній HVDC і UHVDC стався після розробки високовольтних тиристорів і, пізніше, IGBT, що дозволили створювати більш ефективні статичні перетворювачі.

Проте, вартість сучасних перетворювальних підстанцій на постійному струмі істотно перевершує вартість підстанцій на змінному струмі. У той же час, лінія постійного струму коштує дешевше, ніж лінія змінного струму - через меншу кількість проводів, ізоляторів, лінійної арматури, більш легких опор і відсутності пристроїв векторного і скалярного регулювання (компенсації) реактивної потужності (ПРП). У вітчизняній енергетиці ПРП вважаються основною частиною гнучких систем передачі змінного струму (Flexible Alternating Current Transmission Systems, FACTS). До ПРП відносяться конденсаторні батареї, шунтуючі реактори, фільтри вищих гармонік, статичні тиристорні компенсатори та ін.

Необхідно також враховувати, що в ЛЕП на змінній напрузі (HVAC) більш інтенсивно утворюється коронний розряд, ніж на ЛЕП HVDC. Втрати від коронного розряду можуть становити, при поганих погодних умовах (дощ, мокрий сніг, паморозь, ожеледь, іній) до 40% від втрат на нагрівання проводів. Застосуванням проводів більшого діаметра (т. зв. «розширених»), а також «розщеплення» фаз зменшують втрати на коронний розряд, проте збільшують вартість ЛЕП.

Очевидно, що лінії UHVDC найбільш актуальні для країн, що мають великі відстані між місцями споживання і виробництва електроенергії (між промисловими центрами і вугільними басейнами, великими річками).

Що ж стосується кабельних ліній, то в них перевага постійного струму проявляється вже на дальності порядку декількох десятків кілометрів через

зменшених втрат електроенергії і менших вимог до ізоляції. При однаковій вартості кабелів, потужність, що передається по лінії постійного струму, перевищує потужність лінії змінного струму приблизно втричі. Саме тому кабельні DC-лінії так часто застосовуються для подолання великих водних перешкод. По всьому світу побудовані багато десятків таких ліній, в тому числі з використанням нових технологій HVDC Light (ABB) і HVDC Plus (Siemens) з напругою до ± 320 кВ і діапазоном потужностей 30-330 МВт.

Проекти HVDC для міжміської передачі мають два (або, рідше більше) перетворювальних станції та лінію електропередачі, що з'єднує їх. Як правило, повітряні лінії використовуються для взаємоз'єднання, але найважливім класом HVDC проектів є ті, які використовують підводні силові кабелі. Станція зворотного зв'язку не має лінії електропередачі і з'єднує дві мережі змінного струму на різних частотах або фазах. Історичні (кінець XIX століття) системи HVDC використовували схему підключення Тюрі із двигунами-генераторами.

1.2.1. Перші кроки до будівництва глобальної супермережі

Технічно, вона буде базуватись на всесвітньопротяжній системі електропередачі високої напруги постійного струму (HVDC), більшість складових (компонентів) якої вже існує.

Як ми можемо бачити з Додатку А, перші початки супермережі постійного струму беруть свій старт ще з кінця XIX ст у країнах Західної Європи (Німеччина, Франція, Італія, Швеція). Основною метою їх будівництва було дослідження високовольтного обладнання електротехнічними компаніями ABB, BBC та ASEA. Наприклад так від дельти річки Горзенте в Італії до міста Генуя була побудована лінія постійного струму, напругою 6 кВ, потужності 0,0025 МВт та протяжністю всього десятків кілометрів. Згодом компанія ABB апгрейдила її до напруги 14 кВ, потужності 2,5 МВт, протяжності 120 км. Чи наприклад лінія

Веттінген – Цюріх, що будувалася лише як експериментальний об'єкт ВВС у Швеції. І таких прикладів досить багато (табл. 1). Але через стрімкий розвиток технологій змінного струму, де відпала потреба у лініях постійного струму, ці проекти були закриті, а самі лінії розібрані (табл. 1, №1-13).

На сьогоднішній час існують активні проекти, що являються, на мою думку, основою майбутньої світової супергрід.

European super grid - це можлива майбутня супер мережа, яка в кінцевому підсумку сполучатиме різні європейські країни та регіони навколо європейських кордонів, включаючи Північну Африку, Казахстан та Туреччину, з енергосистемою високовольтного постійного струму. Передбачається, що європейська супермережа:

- ✓ знизить вартість електроенергії у всіх країнах-учасниках, дозволяючи всім регіону розділяти найбільш ефективні електростанції;
- ✓ зменшить мінливість навантаження і ненадійність електростанцій, зменшить неефективне резервування потужності та режим очікування;
- ✓ дозволить ширше використовувати відновлювані джерела енергії, особливо енергію вітру, від концепції, що "завжди десь вітряно", як, наприклад, влітку у Північній Африці та взимку у Європі;
- ✓ дозволить широко розподіляти загальний європейський гідроенергетичний ресурс, що становить близько 6 тижнів від європейського виробництва;
- ✓ зменшить залежність від палива.

Було запропоновано ряд інших спеціальних схем для створення надміцних мереж різної міри в Європі.

North Sea Offshorgrid - активна пропозиція Європейської комісії, яка вперше була запропонована в листопаді 2008 р. Як будівельний блок до загальноєвропейської супермережі з участю Німеччини, Сполученого Королівства, Франції, Данії, Швеції, Нідерландів, Бельгії, Ірландія та

Люксембурга.. Як і в сітці Північної Європи, це призведе до збору вітрової енергії, виробленої в Північному та Балтійському морях, відкриваючи більш широкі ринки для цих ресурсів.

Грінпіс запропонував проекти Low Grid для зв'язку країн Центральної Європи, зокрема Німеччини, Нідерландів, Бельгії і Франції; та High Grid для зв'язку Європи та Північної Африки, що, власне, підкреслює встановлення сонячної енергетики на півдні Європи.

ISLES (Irish-Scottish Links on Energy Study)- активна пропозиція, на стадії здійсненності станом на вересень 2011 р. Основною метою є зв'язати Шотландію, Північну Ірландію та Ірландією з виробництвом поновлюваних джерел енергії у прибережних сферах.

EU PowerNet. Відноситься до кооперативної компанії, що належить і регулюється національними об'єднаними компаніями за участі європейських держав. Ця концепція визнає національний суверенітет цих держав, а також реалізацію прямих з'єднань між усіма мережами TSO, а не тільки між сусідами.

DESERTEC – концепція, заснована на ідеї створення станцій сонячної енергії концентруючого типу в Північній Африці та на Близькому Сході та експорту влади в Європу лініями HVDC.

Medgrid - це проект, запланований в Північній Африці, який має на меті сприяти розвитку євро-середземноморській електричній мережі, яка забезпечить Північну Африку та Європу недорогою поновлюваною електроенергією, переважно сонячною енергією. Мета - встановити 20 ГВт потужності в цілому та 5 ГВт для експорту для Європи.

У 2008 р введена в експлуатацію найбільш довга в світі підводна кабельна система NorNed, що з'єднує Норвегію і Нідерланди. Довжина кабелю становить 580 км, потужність - 700 МВт, напруга ± 450 кВ.

NorGer буде покладено початок у Тонстаді в Норвегії. З трамвайної лінії 70-кілометровий Тонстад проходить до площі Флеккефьорд. Від Флеккефьорд

570-кілометровий високовольтний постійний струм підводного кабелю пройде через Північне море до Мюрієм, Німеччина. Планується, що NorGer буде мати пропускну здатність 1400 МВт та робочу напругу 450-500 кВ.

NSN Link (North Sea Network Link) - електричний кабель постійного струму високої напруги потужністю 1400 МВт підводного порту, що будується між Норвегією та Англією. Це спільний проект операторів системи транспорту Statnett та National Grid plc, який має бути завершено у 2021 році. Проект був запропонований в 2003 році, коли Statnett та National Grid підготували 1200 МВт між Suldal у Норвегії та Easington County Durham у Великобританії. На даний час цей проект був призупинений.

NorthConnect (також відома як мережа Шотландія – Норвегія) - це пропонований 650-кілометровий, потужністю 1400 МВт HVDC лінк через Північного моря. Проект вартістю 1,75 мільярда фунтів стерлінгів розробляється компанією норвезькою NorthConnect, спеціально створеною п'ятьма електроенергетичними компаніями Agder Energi, E-CO, Lyse, SSE plc та Vattenfall. 2020-й вважається датою старту проекту.

HVDC Moyle Interconnector - це зв'язок HVDC потужністю 500 МВт між Охенкрошем, Південним Айрширом у Шотландії та Ballycronan More, County Antrim в Північній Ірландії, який розпочав свою діяльність у 2001 році. Він знаходиться у власності та експлуатації компанії Mutual Energy.

У Nordic Grid планується, що до 2030 року Північна Європа побачить значне збільшення відновлюваної енергії від вітру та гідроенергетики. Незважаючи на те, що багато з цих країн вже взаємопов'язані один з одним, для подальшого надлишку експорту до решти Європи та, можливо, Росії, буде потрібним подальший розвиток енергосистеми.

IceLink - це недавнє втілення 60-річної ідеї зв'язати енергетичну систему Ісландії з Європою через Шотландію. Зростаюча зацікавленість у цьому проекті

викликала все більш високі ціни на електроенергію в Європі та більш амбітні цілі відновлюваної енергетики.

Hydrogen-Electric Energy Supergrid: Передбачувана як загальнопоширена підземна мережа передачі сигналів HVDC, ця мережа буде покладатися на розробку відпрацьованого водню передових ядерних реакторів. Лінія електропередачі, зроблена з надпровідного кабелю, передаватиме електроенергію, а також водень для охолодження кабелю. Водень також забезпечить денне зберігання енергії для вирівнювання піків енергоспоживання. Надмірна кількість водню може бути продана на місцевих електричних ринках або для комерційно використовуватися.

У Додатку Б показано загальну картографію вже існуючих ліній, проекти ліній, що розглядаються та у розробці, а у табл. 1 вказані їх назви та пункти..

Таблиця 1.
Середні і великі зв'язки HVDC в Західній Європі

№ п/п	Назва пункту	Конверторна станція 1	Конверторна станція 2	Помітки
1	Ісландія – Великобританія	Ісландія	Великобританія	Варіант, що обговорюється
2	Moyle – Мойл	Аухенхорш, Велика Британія	Балікронан Мор, Велика Британія – Північна Ірландія	1,1 ГВт
3	NSN Link – НСН Лінк	Квіллдаал, Норвегія	Бліт, Англія	1,4 ГВт
4	Viking Link – Вікінг Лінк	Ресвінг, Данія	Байкер Фен, Велика Британія	Варіант, що обговорюється; 600 МВт
5	Kattegat – Каттегат	Норвегія	Зеландія, Данія або Південна Швеція	Варіант, що обговорюється
6	Фенно-Скан	Раума, Фінляндія	Даннебо, Швеція	-
7	Vyborg – Выборг	-	-	-
8	Estlink – Естлінк	Еспо, Фінляндія	Харку, Естонія	-
9	NorNed – НорНед	Емсхавен, Нідерланди	Феда, Норвегія	-
10	Skagerrak 1, 2, 3 і 4 – Скагеракк 1, 2,3,4	Т'ель, Данія	Крістіансанд, Норвегія	
11	Конті-Скан 2	Вестер, Хассінг, Данія	Швеція	
12	Готланд, Швеція	Вастервік	Ігн	

№ п/п	Назва пункту	Конверторна станція 1	Конверторна станція 2	Помітки
13	NordE.ON 1 – НордЕ ОН 1	Диле, Німеччина	Платформа Боркум 2, Німеччина	
14	StoreBælt – СторБельт, Данія	Фрауд	Херслев	
15				
16	SwePol - ШвеПоль	Вежбенчін, Польща	Стане, Швеція	
17	Baltic Cable – Балтик Кабель	Любек-Герренвик, Німеччина	Круссеберг, Швеція	
18	Kontek – Контек	Б'євасков, Данія	Бентвіх, Німеччина	
19	Східно-Західний міжзв'язок	Лінстер, Ірландія	Уельс, Англія	В експлуатації з 2012 року
20	BritNed – БрітНед	Грейн, Велика Британія	Маасвлакте, Нідерланди	В експлуатації з квітня 2011 року
21	HVDC Cross-Channel – Перехресний канал HVDC	Мандарини, Франція	Селліндж, Велика Британія	
22	SACO I 1 (Італія – Корсія – Сардинія)	Суверенто, Італія (до 1992 Італія - Сан Далмажіо)	Лучіана, Франція; Кондрогіанос, Італія	
23	SAPEI – САПЕІ, Італія	Сардинія	Італія	
24	Cometa – Комета, Іспанія	Валенсія	Майорка	
	EuroMed – ЄвроМед			
25		Алжир	Іспанія	
26		Алжир	Сардинія	
27		Туніс	Сицилія	
28		Тріполі	Сицилія	
29	HVDC Italy-Greece – HVDC Італія-Греція	Арахтос, Греція	Галатіна, Італія	

До самих великих перешкод, з якими стикається глобальна супермережа, - це як платити за це. Важко приєднати тверде число до такого величезного та складного завдання, але сторони зазначають, що його витрати більш ніж компенсуються його багатьма перевагами. У 2017 році в журналі Renewable Energy Spyros Chatzivasileiadis, Демієн Ернст та Геран Андерссон розглянули попередні дослідження супердрайдів, а також завершили проекти, щоб оцінити, що буде потрібно для побудови кабелю HVDC під водою напругою 800 кВ, потужністю 3 ГВт та протяжністю 5500 км. Автори дійшли висновку, що сам кабель буде коштувати від 1,15 млн євро до 1,8 млн. євро за кілометр, а кожен термінальний конвертер обійдеться приблизно в 300 мільйонів євро.

Припускаючи, що теплові втрати становитимуть 3 відсотки, а термін служби становитиме 40 років, дослідники вважають, що передача електроенергії за допомогою такого кабелю буде становити від 0,0166 до 0,0251 євро.

Глобальна супермережа буде коштувати багато, і, без сумніву, це займе багато десятиліть. Але очевидні прецеденти для такого зобов'язання вже існують у міжнародних транспортних і телекомунікаційних секторах. Альтернатива нічого не робити і продовжувати впевнено покладатися на викопне паливо - неперспективна, оскільки відключені електромережі - коштуватимуть ще більше.

1.3. Основні схеми електропередач постійного струму

Схема заміщення передачі постійного струму для сталого режиму наведена на рис. 3.

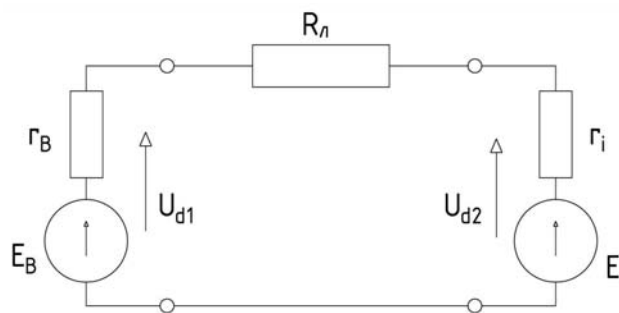


Рис. 3. Схема заміщення передачі постійного струму

Струм в лінії визначається виразом:

$$I_d = \frac{E_B - E_i}{r_B - r_i + R_L} \quad (1)$$

де E_B і E_i - ЕРС випрямляча і протиЕРС інвертора відповідно, R_L - опір лінії постійного струму (омічний опір лінії), r_B і r_i - внутрішній опір випрямляча і інвертора відповідно, визначає їх властивості Потужність, що віддається випрямлячем в лінію постійного струму,

$$P_{d1} = U_{d1} I_d \quad (2)$$

Потужність, що отримується інвертором від лінії,

$$P_{d2} = U_{d2} I_d \quad (3)$$

Для випрямляча напрямки ЕРС і струму збігаються. Це говорить про те, що випрямляч є генератором електричної енергії по відношенню до лінії постійного струму. У той же час по відношенню до передавальної системи він є споживачем цієї енергії.

В інверторі напрямок струму і проти ЕРС протилежні. Це говорить про те, що інвертор споживає енергію від лінії постійного струму і генерує її в прийомну систему. При цьому виконуються умови

$$\begin{cases} E_B > U_{d1} \\ E_i > U_{d2} \end{cases} \quad (4)$$

Ці властивості є загальними для ланцюгів постійного струму, і розглянута схема не виняток. Аналогічні співвідношення є для генераторів і двигунів постійного струму, що працюють спільно. Генератор, споживаючи енергію від приводного двигуна, передає її в ланцюг постійного струму, а двигун, споживаючи енергію від ланцюга постійного струму, передає її машині (знаряддя). При цьому зберігаються напрямки ЕРС і струму, показані на рис. 3., і виконуються умови (4). Важливо відзначити, що для зміни струму в лінії, а отже, і потужності від нуля до номінального значення досить незначно змінювати E_B і E_i , зазвичай в межах 8-10% номінальних значень.

У розглянутій схемі ланкою, що з'єднує випрямляч і інвертор, є лінія електропередачі, яка може мати різні довжину і виконання. Можливі способи виконання ліній постійного струму розглядаються нижче.

Стосовно до вставки постійного струму в даній схемі заміщення буде відсутня лінія постійного струму, але співвідношення (1) – (4) зберігають свою силу (при $R_L = 0$). В цьому випадку реактивні пори ліній змінного струму, що підходять до ВПС будуть ввімкнені в величини r_B і r_i .

Зараз в якості перетворювачів в електропередаванні і вставках постійного струму використовуються статичні керуючі вентильні перетворювачі. Ці

перетворювачі можуть бути двох типів – перетворювачі з неповністю керованими вентилями і перетворювачі з повністю керованими вентилями.

До першого типу відноситься відома трьохфазна мостова схема (рис. 4, а). В цій схемі в якості вентилей використовуються звичайні тиристори, в яких контролюються тільки момент їх відкриття шляхом подачі малопотужного керуючого імпульсу на електрод управління вентиля. Закриваються такі вентиля при переході струму, який в них протікає, через нуль, що виникає під дією інших факторів (не за рахунок подачі сигналу управління). Такі перетворювачі мають властивості перетворювачів струму. Трьохфазна мостова схема була використана при спорудженні майже всіх ППС та ВПС.

Створення другого типу перетворювачів стало можливо завдяки успіхам у розвитку силової напівпровідникової техніки останні два десятиліття. В цей час

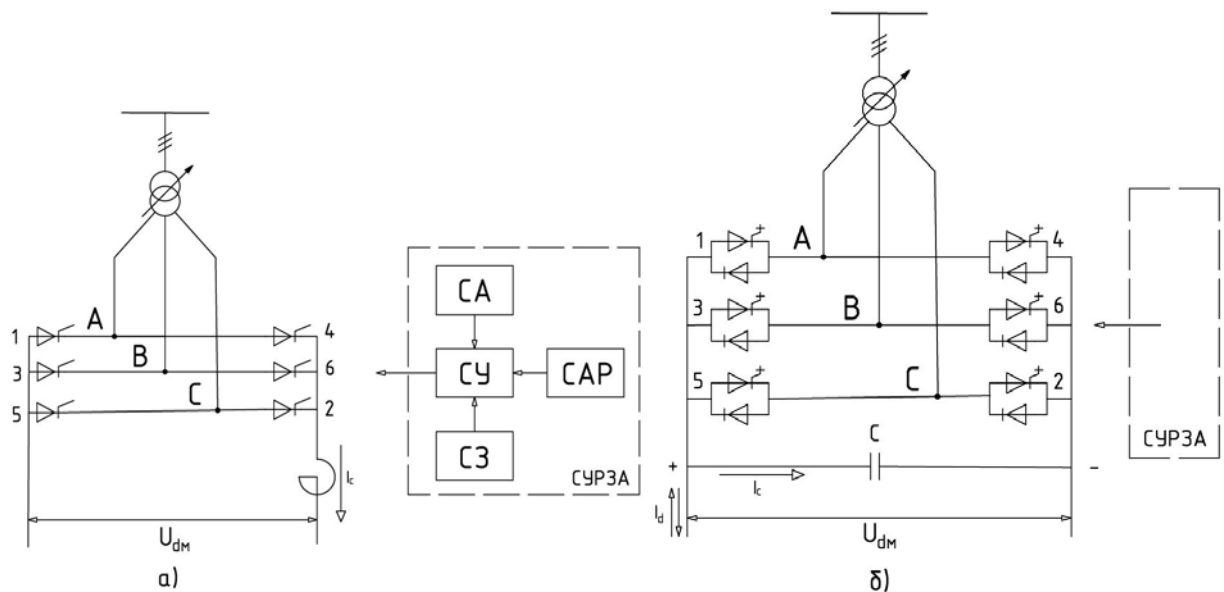


Рис. 4. Схеми перетворювальних мостів: а – на звичайних тиристорах;

б – перетворювачі напруги на повністю керованих вентилях

були розроблені потужні силові транзистори (струми до 2 кА і більш і напруги до 3 кВ) і повністю керовані тиристори, у яких контролюється не тільки момент

їх відкриття, а й момент закриття. Тиристори мають досить високі параметри комутованих струмів 4 – 5 кА і напруги до 7-10 кВ.

Нові напівпровідникові прилади дозволили створити другий тип перетворювачів, які отримали назву перетворювачів напруги (ПН) (рис. 4, б). Цей тип перетворювачів володіє іншими, значно покращеними енергетичними характеристиками, аніж звичайна мостова схема.

Співставляючи два типи перетворювачів, можна відмітити наступні відмінності. Перетворювач першого типу може працювати як випрямлячем, так і інвертором, але при переході з одного режиму в інший. У нього змінюється полярність випрямленої напруги, в той час як полярність струму залишається незмінною. У перетворювача вторгся типу при переході з режиму випрямлення в режим інвертування змінюється напрямок (полярність) струму, але полярність напруги не змінюється.

Перетворювач першого типу при роботі як в режимі випрямляча, так і в режимі інвертування споживає з мережі значну реактивну потужність і має суто несинусоїдальну форму струму фази мережі, що примушує застосовувати фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП) достатньо великої потужності. Перетворювач другого типу в обох режимах може генерувати або споживати реактивну потужність, що виключає необхідність застосування потужних пристроїв, що компенсують. При цьому форма струму фази мережі за рахунок застосування широтно-імпульсної модуляції близька до синусоїдальної, що значно зменшує потужність фільтрів на стороні змінного струму, при використанні перетворювача першого типу коротке замикання в ланцюзі випрямленого струму (в самому перетворювачі або в лінії) може бути відключено закриттям тиристорів шляхом зняття з них керуючих імпульсів, у перетворювача другого типу цього зробити не можна через наявність в його схемі некерованих діодів. Тому коротке замикання слід відключати двома вимикачами в ланцюзі змінного струму-з боку випрямляча і інвертора; у перетворювача першого типу в

ланцюзі випрямленого струму ввімкнений реактор, призначений для згладжування пульсацій цього б, струму, у перетворювача напруги такого реактора немає, але між полюсами включений конденсатор, що необхідно за умовами роботи вентилів перетворювача. Реактори включаються в фази вентильної обмотки трансформатора, в схемі перетворювача першого типу втрати потужності в тиристорах менше, ніж в замикаються тиристорах або транзисторах в схемі перетворювача другого типу, крім того їх вартість нижче.

В даний час перетворювачі напруги розроблені на потужність до МВт при напрузі ± 300 кВ. При їх використанні зараз споруджено кілька ВПС і ППС щодо невеликої потужності (200-600 МВт) з кабельними лініями. Електропередачі постійного струму з перетворювачами напруги і повітряними лініями в даний час немає. Ці перетворювачі ще знаходяться на стадії досліджень і дослідної експлуатації.

Потужні далекі електропередачі постійного струму з повітряними лініями споруджуються і в перспективі будуть споруджуватися з застосуванням перетворювачів на звичайних тиристорах, досвід експлуатації яких показав їх високу надійність. Тому в подальшому тут будуть розглядатися характеристики традиційних перетворювачів, виконаних за схемою рис 4, а.

Сучасний потужний високовольтний перетворювальний блок включає в себе не тільки перетворювач, а й ряд інших елементів, що становлять невід'ємну частину цього блоку. Основним елементом перетворювального моста є вентиль. В даний час в якості вентилів використовуються високовольтні тиристорні вентиля (ВТВ), зібрані з одиничних тиристорів, включених послідовно. При параметрах тиристорів, досягнутих до теперішнього часу, необхідності в паралельному з'єднанні тиристорів, як правило, немає.

Кожен вентиль характеризується наступними основними параметрами середнім значенням струму I_{cp} , що протікає через нього за період частоти мережі, максимальною напругою $U_{в\ max}$, яке прикладається до нього як в прямому, так і в

зворотному напрямку, коли клапан закритий, і яке цей клапан повинен витримати.

У першому наближенні можна прийняти:

$$I_{cp} = \frac{I_d}{3}$$

$$U_{B\ max} \approx 1,3U_{dM}$$

Тоді потужність перетворювального моста буде функцією параметрів клапанів:

$$P_{dM} = U_{dM}I_d \approx 2,3I_{cp}U_{B\ max} \quad (5)$$

Звідси випливає, чим вище струм і напруга клапанів, тим більша одинична потужність моста може бути досягнута. Тому зусилля інженерів і конструкторів спрямовані на розробку клапанів з максимально високими параметрами.

Група клапанів, підключена анодами до загальної шини-полюсу, називається анодним групою, а ті клапани, у яких до полюса підключені катоди, катодні. Частина перетворювальної схеми між полюсом і крапкою, в якій підключена відповідна ваза обмотки трансформатора, називається плечем моста.

Є анодне плече моста і катод плече моста для кожної фази відповідно

Іншим важливим елементом перетворювального блоку є трансформатор, який пов'язує преосвітний міст з мережею передавальної або приймальної системи. Цей трансформатор виконувати дві функції створює необхідне випрямлення напруга моста U_{dM} , що забезпечується вибором відповідного коефіцієнта трансформації, електрично відокремлює ланцюг випрямленого струму від мережі змінного струму.

Необхідність такої гальванічної розв'язки пояснюється наступним. При глухо заземленою нейтраллю мережа 220-500 кВ, куди включаються перетворювачі ППС і ВПС, потенціали фаз по відношенню до землі жорстко фіксовані і в нормальних режимах не перевищують амплітуди фазної напруги. У той же час потенціали окремих мостів по відношенню до землі при їх

послідовному з'єднанні різні і потенціал полюса може істотно перевищувати потенціал фази. Так, наприклад, при $U_d = \pm 750$ кВ і напрузі мережі 500 кВ потенціал полюса дорівнює 750 кВ, амплітуда фазного напруги мережі становить 407,5 кВ. Звідси випливає необхідність їх електричного поділу.

Обмотку трансформатора, приєднаної до мережі живлення називають мережевий обмоткою, а обмотку, підключену до вентильному мосту, - вентильною. Групами з'єднань обмоток трансформатора, які зазвичай застосовуються на практиці, є $Y/Y - 12$ або $Y/\Delta - 11$.

Трансформатори може бути як двообмоткові, так і багатообмоткові, зазвичай трьох- або чотирьохобмоткові. В останньому випадку одна мережева і дві вентильні обмотки приєднані до двох послідовно включеним мостам, до четвертої обмотці можуть підключатися фільтри вищих гармонік або синхронний компенсатор.

Відмінною особливістю перетворювальних трансформаторів є їх більш висока реактивний опір, ніж у звичайних трансформаторів тієї ж потужності. Це пояснюється умовами їх роботи в перетворювальних схемах. Збільшення опору трансформатора необхідно для обмеження швидкості зміни струму в вентильях в процесі їх комутації (значення $\frac{di}{dt}$). Повна потужність трансформатора зазвичай перевищує потужність питомого їм моста на 20-25% у зв'язку з великим споживанням реактивної потужності і збільшеними втрати активної потужності від струмів вищих гармонік.

Вентильні обмотки трансформаторів мають посилену ізоляцію по відношенню до землі в зв'язку з перерозподілі постійної напруги в багатомостових схемах.

Перетворювальні трансформатори забезпечені пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН), що необхідно для зниження споживання мостом реактивної потужності при зміні напруги мережі.

Вентилі, що застосовуються в схемі моста, мають властивість керованості, ті. вони можуть відкритися тільки при подачі на керуючий електрод вентиля електричного імпульсу відносно невеликої потужності. Змінюючи момент подачі цього імпульсу, можна в широких межах регулювати параметри режиму моста (потужність, напруга), переводити міст з випрямного режиму в інверторний і навпаки. Важливо відзначити, що зміна режиму відбувається практично безінерційна.

Управління режимом моста здійснюється за допомогою системи управління СУ (рис 4, а), яка генерує імпульси, розподіляє їх по вентилях моста і виконує необхідний зрушення їх по фазі щодо напруги живлення. На систему управління впливає система автоматичного регулювання САР, що підтримує параметри режиму, наприклад струм в лінії, передану потужність і ряд інших, в заданих межах шляхом зміни фази подаються імпульсів. На СУ впливає також система захисту СЗ, автоматично знімає передачу керуючих імпульсів на вентилі при виникненні аварійних ситуацій в перетворювальній мосту або в лінії. Крім того, на СУ впливає система автоматики СА, яка здійснює, наприклад, автоматичне введення моста в роботу після дії захисту і виконує ряд інших функцій. Всі ці системи об'єднані в один комплекс СУРЗА (система управління, регулювання, захисту, автоматики), який є невід'ємною частиною перетворювального блок. На сучасних ППС і ВПС комплекс СУРЗА виконується з використанням мікропроцесорної техніки.

В полюс моста включений реактор з індуктивністю L_{ct} . У багатомостових схемах підстанцій цей реактор включається в кожен полюс передачі перед лінією. Зазвичай він має досить велику індуктивність 0,5-1,0 Гн. Цей реактор призначений для згладжування пульсацій випрямленого струму і виключає спільно з фільтрами 6-у і 12-у гармоніки, встановленими на полюсах, проникнення цих гармонік в лінію. Крім того, цей реактор обмежує значення $\frac{di}{dt}$

при аваріях на лінії, що диктується умовами роботи вентилів, а також захищає обладнання підстанції, перш за все перетворюючі мости, від хвиль перенапруг, які можуть прийти з лінії. Для зменшення втрат потужності реактор виконується з дуже високою добротністю $Q = \frac{x}{R}$ і обмотками без сталевго сердечника.

Одним з обов'язкових елементів перетворювального блоку є фільтрокомпенсуючі пристрої. Вони призначені для компенсації струмів вищих гармонік, що генеруються перетворювачем, і реактивної потужності, яка їм споживається до складу ФКП входять фільтри струмів вищих гармонік, батареї статичних компенсаторів, синхронні компенсатори або статичні джерела реактивної потужності. Схеми включення і склад елементів ФКП можуть бути різними. Так, наприклад, фільтри можуть вмикатися як на додаткову обмотку трансформатора перетворювача, так і безпосередньо на шини, куди включена його мережева обмотка. Синхронні компенсатори або інші пристрої, що компенсують також можуть бути включені або на шини мережі через додаткові трансформатори, або на додаткову обмотку перетворювального трансформатора. Зазвичай питання вирішується в комплексі компонування обладнання всій перетворювальної підстанції. Доцільність розміщення фільтрів вищих гармонік в тій чи іншій точці її схеми багато в чому визначається параметрами примикає мережі змінного струму і її частотними характеристиками

Є розроблений і випробуваний преосвітній міст потужністю 750 МВт. Перетворюючі мости найпотужнішої ППС мають потужність 400 МВт. В принципі, при досягнутих параметрах тиристорів перетворюючі мости можна конструювати на великі потужності. Однак тут виникає обмеження, пов'язане з можливістю виконання трансформаторів, що живлять перетворювач. Вище вже зазначалося, що ці трансформатори працюють в значно важчих умовах, ніж звичайні, і їх потужність повинна бути більше потужності перетворювального моста. Все це призводить до ускладнення їх конструкції і збільшення маси, що в

кінцевому підсумку викликає великі труднощі з їх транспортуванням. Тому максимальна потужність перетворювального трансформатора, досягнута в даний час, становить близько 400 МВА на фазу. Мабуть ця потужність близька до граничної і різке її збільшення малоймовірно. Для порівняння зазначимо, що максимальна потужність звичайного трансформатора 500 кВ становить 533 МВА на фазу.

Звідси виникає проблема збільшення потужності всієї передачі при обмеженій потужності перетворювальних мостів. Цю проблему можна розділити на дві - збільшення потужності електропередач постійного струму і збільшення потужності вставок постійного струму.

Для дальніх електропередач, як відомо, найважливішим фактором є збільшення потужності і, як наслідок, напруги. Тому збільшення потужності електропередачі і одночасно її напруги можна досягнуто шляхом послідовного (каскадного) з'єднання декількох перетворювальних мостів.

При цьому напруга полюса дорівнює сумі напруг окремих мостів (рис. 5, а). Для того щоб обмежити кількість послідовно включених мостів з метою спрощення схеми підстанції, необхідно, щоб кожен міст мав досить високу випрямлена напруга, що, природно, збільшує вартість обладнання. Однак для дуже потужних електропередач цього рішення може бути недостатньо. Для збільшення потужності електропередачі необхідно збільшити ще й струм полюса. З цією метою вдаються до паралельному з'єднанню двох гілок, в кожному з яких входять кілька послідовно з'єднаних перетворювальних мостів (рис. 5, б). Такий підхід може бути пояснений тим, що поки що немає можливості виготовити обладнання, в тому числі перетворюючі трансформатори і лінійні реактори, на необхідні потужності і номінальні струми. Ще одним шляхом збільшення потужності дальньої електропередачі є спорудження другої, паралельної ланцюга лінії (рис. 5). Вибір того чи іншого варіанту рішення задачі повинен проводитися на підставі ретельних техніко-економічних зіставлень.

Для вставок постійного струму, оскільки лінії постійного струму тут немає, немає необхідності значно збільшувати випрямлена напруга, що позитивно позначається на вартості обладнання і спрощує конструктивні рішення. Тому в ВПС збільшення потужності досягається за рахунок паралельного включення перетворювальних блоків меншої потужності і більш низького, ніж в ППС, напруги. Причому збільшення потужності ВПС може здійснюватися і надалі в міру необхідності шляхом паралельного включення нових блоків. У той же час і тут доводиться вдаватися до каскадному з'єднанню перетворювальних мостів кожного блоку, щоб зменшити вміст струмів вищих гармонік в мережевому струмі перетворювача.

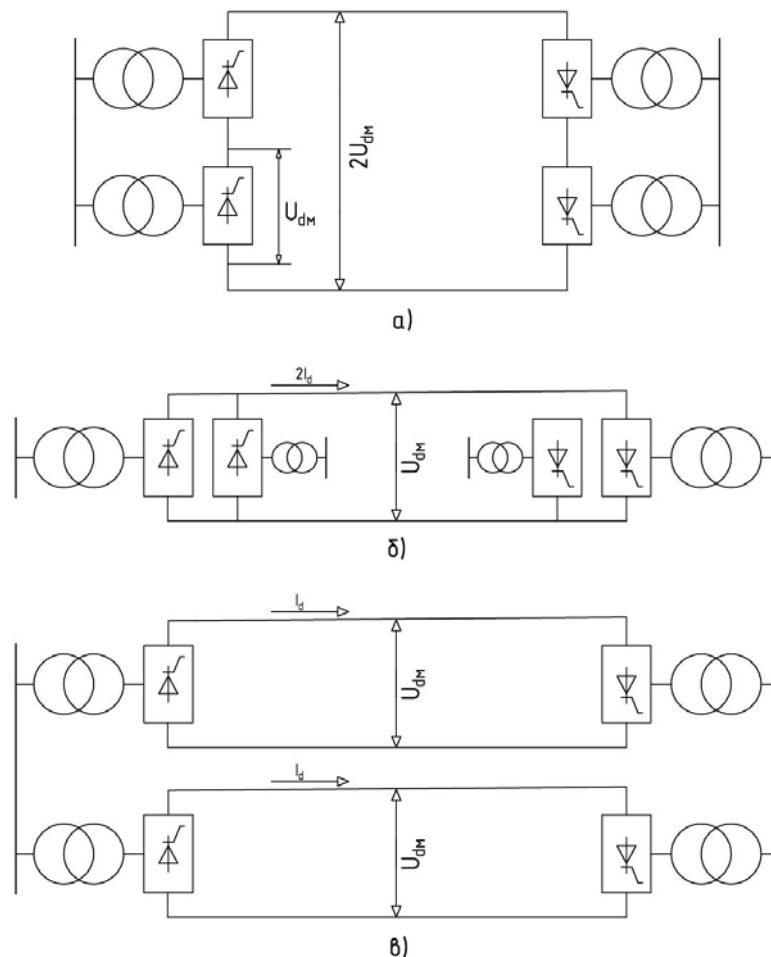


Рис. 5. Можливі схеми збільшення потужності передавання постійного струму: а – збільшення напруги полюса; б – збільшення струму полюса; в – двохколова лінія

Для вставок постійного струму, оскільки лінії постійного струму тут немає, немає необхідності значно збільшувати випрямлена напруга, що позитивно позначається на вартості обладнання і спрощує конструктивні рішення. Тому в ВПС збільшення потужності досягається за рахунок паралельного включення перетворювальних блоків меншої потужності і більш низького, ніж в ППС, напруги. Причому збільшення потужності ВПС може здійснюватися і надалі в міру необхідності шляхом паралельного включення нових блоків. У той же час і тут доводиться вдаватися до каскадному з'єднанню перетворювальних мостів кожного блоку, щоб зменшити вміст струмів вищих гармонік в мережевому струмі перетворювача.

Вище було обговорено можливі схеми перетворювальних підстанцій. Тепер розглянемо можливі схеми виконання самих електропередач постійного струму.

Оскільки ланцюги змінного і постійного струму в ППС електрично не пов'язані, то, якщо в ланцюзі постійного струму відсутній зв'язок з землею, потенціали щодо землі в цьому ланцюзі будуть визначатися випадковими чинниками, головним чином струмами витоку по ізоляції, що неприпустимо, так як в цьому випадку неможливо здійснити координацію ізоляції. Тому хоча б одна з точок в ланцюзі постійного струму повинна бути заземлена. На практиці в ППС зазвичай заземлюють дві точки. Це можуть бути або один з полюсів передачі, заземленою з двох сторін лінії, або середні точки перетворювальних підстанцій.

У першому випадку, коли заземлюється один з полюсів передачі, провід цього полюса зазвичай відсутня, його роль виконує земля. На відміну від змінного струму, який в зворотному напрямку протікає на певній глибині в землі, дотримуючись всіх вигинів траси лінії, постійний струм протікає по всій площі землі. Активний опір землі практично не залежить від її питомого опору, а є тільки функцією частоти струму і визначається з виразу:

$$r_3 = \pi^2 f \quad (6)$$

При $f = 0$ заземлення землі також рівний нулю. Тому опір заземленого полюсу буде визначатись тільки опором розтікання заземлювачів, за допомогою яких полюс з'єднується з землею. Цей опір має дуже маленьке значення – доли ома і не впливає на режим передачі. Тому для електропередачі необхідно тільки один полюс, підвішений на ізоляторах, якщо лінія повітряна, чи у вигляді одножильного кабелю, прокладеного в траншеї чи по дну проливу. Такі передачі називають уніполярними. Схема уніполярного ППС приведена на рис. 6.

Зазвичай уніполярні електропередачі споруджуються при перетині великих водних просторів, наприклад морських проливів. Для передачі потужності від випрямляча до інвертора необхідно прокласти лише одинарний одножильний кабель, розрахований на напругу полюс – земля $U_{d(n-3)}$. Заземлюючі електроди закладаються в землю безпосередньо на березі чи опускаються у воду. В останньому випадку проводяться заходи з захисту водної фауни від впливу струму розтікання.

За такою схемою виконаний цілий ряд електропередач. Італія – Сардинія в Середземному морі, Швеція – Данія через протоку Скагеррак в Балтійському морі, Швеція – Фінляндія і ряд ін. На електропередачі Швеція – Фінляндія, яка є найпотужнішою з уніполярних передач (500 МВт, 400 кВ, 230 км) прокладений кабель довжиною 200 км лише з однією сполучною муфтою.

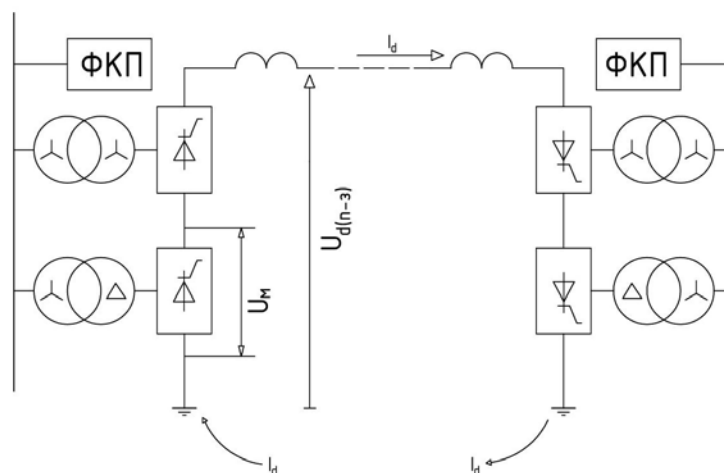


Рис. 6. Схема уніполярної передачі постійного струму

Використання землі для повернення струму має і свої негативні сторони. Найбільш істотним недоліком тут є можливість корозійного руйнування металевих інженерних споруд - трубопроводів і кабелів, прокладених в Зегіле поблизу заземлювача. Частина струму передачі поширюється по цих споруд і, стікаючи з них, може викликати їх пошкодження внаслідок електролізу аж до утворення отворів в трубопроводах або оболонках кабелів. На підставі розрахунків і експериментальних досліджень встановлено, що при струмі заземленого полюса, рівному кА, радіус небезпечної зони навколо заземлювача становить 5 км. Для підземних споруд, розташованих в цій зоні, необхідно застосування катодного захисту. У деяких випадках, коли лінія прокладається в місцевості, де багато підземних інженерних споруд, наприклад при глибокому введенні в місто, щоб уникнути розтікання струму по землі заземлений полюс виконується у вигляді кабелю, жила якого заземлена з двох сторін.

Область застосування уніполярних ППС – передача відносно невеликих потужностей (декілька сотень мегават) на порівняно невеликі відстані, головним чином при перетині водних перешкод. Для потужних електропередач застосовують іншу схему, в якій лінія виконана з двома полюсами і кожен з них ізольований від землі заземлюючи середні точки перетворювальних підстанцій. Така передача називається біполярною. Схема одного ланцюга такої передачі наведена на рис. 7 іноді такий ланцюг називають біполем. При необхідності збільшення потужності передачі споруджують другий такий ланцюг.

Завдяки тому, що середні точки перетворювальних підстанцій заземлені, кожен ланцюг може бути розділений на два незалежних напівкола. У нормальних режимах струм від випрямляча до інвертора передається по позитивному полюсі лінії і повертається по негативному. При рівній навантаженні обох напівкіл струм в землі дорівнює нулю. Однак слід зазначити, що на практиці неможливо забезпечити повну ідентичність параметрів обладнання і параметрів режиму кожного напівкола. Тому деякий небаланс завжди існує, і струм в землі не рівний

нулю. Однак він багато менше струму полюса, і в подальшому ми його не будемо враховувати. При виході одного напівкола з роботи, інший продовжує працювати з поверненням струму через землю. При цьому потужність передачі зменшується вдвічі, проте передача, хоча і зі зниженою потужністю, продовжує працювати.

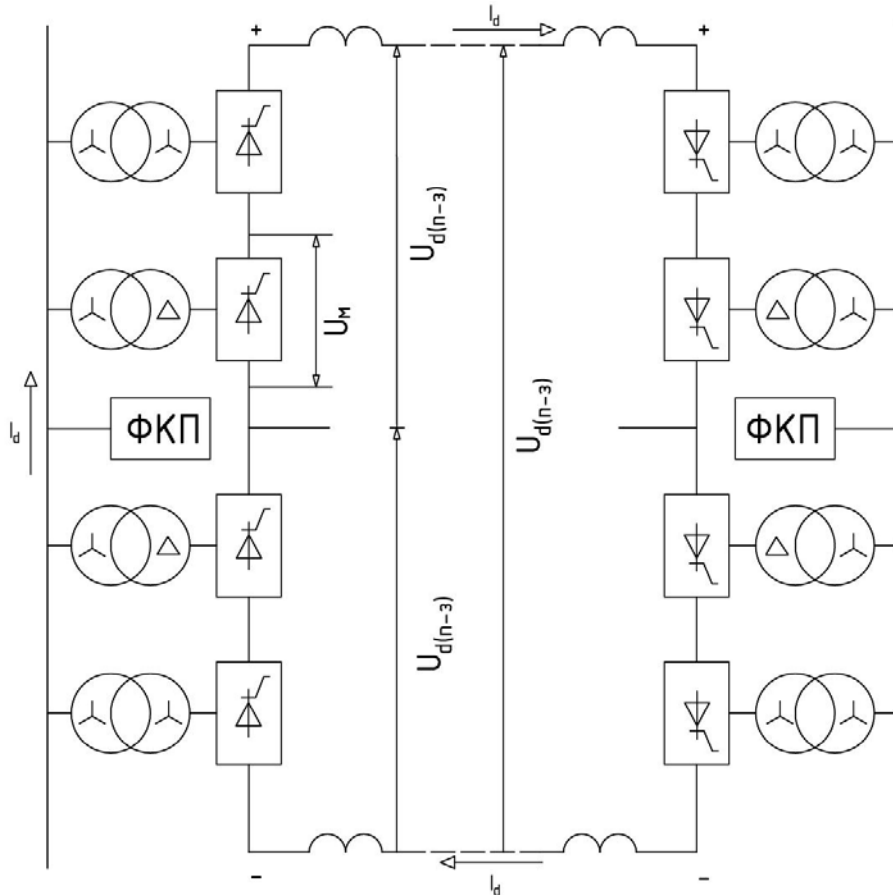


Рис. 7. Схема біполярної передачі постійного струму

Для потужних електропередач, у яких струм полюса складає кілька кілоампер, зона небезпечного впливу струму в землі значно більше згаданої раніше. Тому точки заземлення за допомогою спеціальних ліній виносяться на відстань у кілька десятків кілометрів від перетворювальних підстанцій.

Для біполярних передач розрізняють два види напруг лінії. Напруга полюс – земля і напруга полюс – полюс. Очевидно, що напруга полюс – полюс в 2 рази більше напруги полюс – земля. Тому передача, наприклад, ± 500 кВ і передача 1000 кВ – це одна і та ж передача.

Область застосування біполярних електропередач – передачі великих потужностей на великі відстані. По біполярній схемі виконані всі потужні і далекі електропередачі постійного струму, побудовані до теперішнього часу Ітайпу (Бразилія), Тихоокеанська (США), Кабора Басса - Апполо (Мозамбік - ПАР) і багато інших. За цією ж схемою будувалася електропередача Екібастуз - Центр, відмінність якої від згаданих передач полягає в тому, що тут були використані по дві гілки перетворювальних мостів на кожен підстанцію.

Іноді до біполярним передачам вдаються і в інших випадках. Наприклад, ППТ Англія – Франція, прокладена через протоку Ла - Манш, виконана як біполярна. Однією з причин, привелених до такого рішення, було прагнення уникнути впливу магнітного поля однополюсної лінії на навігаційні прилади суден, що йдуть по протоці.

Слід зазначити, що розроблені до теперішнього часу схеми високовольтних перетворювачів напруги недопускають заземлення будь-якого полюса лінії. Тому такі перетворювачі не можуть застосовуватися для спорудження уніполярних і біполярних електропередач постійного струму.

Лінії постійного струму, як уніполярні, так і біполярні, не мають лінійних вимикачів. Роль останніх з успіхом виконують керовані вентиля перетворювача.

При виникненні аварійних ситуацій в лінії постійного струму досить зняти керуючі імпульси з вентилів випрямляча (закрити вентиля), щоб струм в лінії припинився. Закриття вентилів може бути виконано як вручну черговим персоналом підстанції, так і автоматичними пристроями захисту, що реагують на виникнення пошкодження.

Відсутність лінійних вимикачів спрощує конструкцію перетворювальної підстанції та сприятливо відбивається на її економічних показниках. Однак таке рішення може бути прийнято лише для магістральних електропередач, ті передач, які не мають проміжних відборів потужності. Для передач з проміжними

відборами доцільно застосування вимикачів постійного струму для локалізації аварій, які можуть виникнути на окремих ділянках передачі.

Для проміжного відбору потужності від ППС необхідно в точці відбору спорудити проміжну перетворювальну підстанцію, на яку можна подати напругу від місцевої енергосистеми для забезпечення роботи інвертора. Ця проміжна перетворювальна підстанція може бути включена в лінію послідовно або паралельно.

При послідовному ввімкненні проміжної підстанції частину перетворювальних мостів ніби рознесена по лінії від кінцевих підстанцій в проміжні точки. Кожна з проміжних підстанцій може працювати як в випрямному, так і інверторному режимах. При роботі в випрямному режимі енергія проміжної системи надходить в лінію постійного струму, при роботі в інверторному режимі – ця енергія відбирається від неї і надходить в проміжну систему.

Недоліком схеми послідовного відбору потужності є взаємна залежність роботи всіх підстанцій. Це виявляється у складності регулювання потужності окремих підстанцій, оскільки значення струму в послідовному ланцюзі має залишатися незмінним на всіх її ділянках. Вихід з роботи будь-якої з підстанцій в результаті аварії може привести до переривання струму і знеструмлення всіх інших підстанцій. Тому проміжні підстанції повинні бути обладнані шунтуючими апаратами, в тому числі шунтуючими вентилями, які автоматично включаються при аварії на даній підстанції. Крім того, слід врахувати, що все перетворювальне обладнання проміжної підстанції повинно бути розраховане на напругу полюса, що збільшує його вартість.

Паралельне ввімкнення проміжних підстанцій, по-перше, дозволяє здійснити незалежне регулювання потужності на всіх підстанціях і змінювати її напрямок, переходити на будь-якій з підстанцій з режиму випрямляча в режим

інвертора і навпаки, по-друге, перейти до створення мережі високої напруги постійного струму, призначеної для зв'язку декількох проміжних енергосистем.

Недолік схеми ППС з паралельним відбором потужності полягає в необхідності використання вимикачів постійного струму для відключення пошкоджених ділянок. Вимикачі можуть бути замінені роз'єднувачами з дистанційним приводом. Але в цьому випадку необхідно спочатку знеструмити всю передачу, потім під час безструмової паузи відключити пошкоджену ділянку передачі і знову її включити. Знеструмлення передачі може бути виконано зняттям керуючих імпульсів з перетворювачів, що працюють як випрямлячі (закриттям перетворювачів). Все це виконується засобами захисту та автоматики електропередачі. На п'ятипідстанційній ППС Канада – США використаний саме цей метод. Цей же метод використаний на і на електропередачі Італія – о Корсика – о Сардинія з відбором потужності на о Корсика.

У разі, якщо якісь перетворюючі підстанції в схемі їх паралельного включення повинні за умовами режиму працювати як в випрямному, так і в інверторному режимі, то на таких підстанціях необхідно мати пристрій для перемикання полярності полюсів перетворювача, щоб змінювати полярність перетворювачей при збереженні полярності напруги лінії.

Для вставок постійного струму, як уже зазначалося, немає необхідності збільшувати напругу і потужність перетворювального блоку. Збільшення потужності вставки досягається паралельним включенням декількох блоків, аналогічно тому, як це робиться на електростанціях при паралельному включенні генераторів.

Як приклад може бути наведена ВПС Росія – Фінляндія в м Выборзі. Вона складається з чотирьох однакових комплексних високовольтних перетворювальних пристроїв (КВПП) потужністю 355 МВт кожна і підключених з одного боку до шин 330 кВ системи Лененерго, з іншого - до шин 440 кВ, пов'язаним з енергосистемою Фінляндії. Перетворювачі (випрямляч, інвертор)

кожного КВПП розміщені в окремій будівлі, де також знаходяться всі системи, які обслуговують ці перетворювачі (СУРЗД система охолодження і ін). Випрямлена напруга кожного моста рівна 85 кВ. Парні мости випрямляча і інвертора мають номінальну напругу в контурі постійного струму 170 кВ, номінальний струм 2100 А. Перетворювачі пов'язані з шинами 330 і 400 кВ за допомогою однофазних чотирьохобмоткових трансформаторів потужністю 135 МВА на фазу. В контур постійного струму включені два розподільчих згладжуючих реактора з індуктивністю 0,1 Гн кожен. Одна з обмоток трансформаторів напругою 38,5 кВ використовується для підключення фільтрів струмів вищих гармонік. Крім того, такі фільтри підключені також безпосередньо до шин 330 і 400 кВ. Компенсація реактивної потужності перетворювачів виконується частково за рахунок фільтрів вищих гармонік, які на частоті 50 Гц є генераторами реактивної потужності, а також синхронних компенсаторів, підключених до шин 330 і 400 кВ через трансформатори.

1.4. Схемотехнічне моделювання уніполярної передачі постійного струму

Напруга полюса $U_{\text{п}}$ дорівнює напрузі між полюсом і землею. Наприклад, для передачі енергії Конверторна станція 1 – Конверторна станція 2 напруга першого полюса щодо землі дорівнює +400 кВ, а другого - 400 кВ. Тоді напруга $U_{\text{д}}$ між полюсами становить 800 кВ. Передача може бути розділена на два незалежні ланцюги. У нормальному режимі при рівних точках струм через землю близький до нуля. Оскільки обидва ланцюга передачі можуть працювати автономно, то у випадку аварії одного з полюсів половина потужності передаватиметься до іншого полюса через землю.

В уніполярній передачі заземлений лише один з полюсів, а також є провід, ізолюваний від землі. Другий провід або заземлений з двох сторін передачі, або відсутній. Такий заземлений другий провід застосовується лише в тих випадках,

коли неприпустиме застосування струму в землі (наприклад, при надходженні до великих міст). Як правило, один ланцюг уніполярної передачі може складатися з одного проводу і землі.

На рис. 8 зображений фрагмент уніполярної передачі постійного струму з наявним другим ізолюваним проводом, активний опір якого становить 1 МОм, а індуктивність – 0.5986 Гн. Генерація моделюється трьома функціональними джерелами напруги $E_1 = 345 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(2\pi \cdot 50t)$ В, E_2 та E_3 , що відрізняються на фазний кут $\pm \frac{2\pi}{3}$ в залежності від фази. На рис. 10 зображено модель уніполярної передачі постійного струму з одним ізолюваним проводом та заземленням обох полюсів. На рис. 12 представлено схема з двома ізолюваними проводами та заземленою середньою точкою. Графіки напруги схем представлені на рис. 9, 11 та 13 відповідно. Параметри для усіх трьох схем залишаються незмінними.

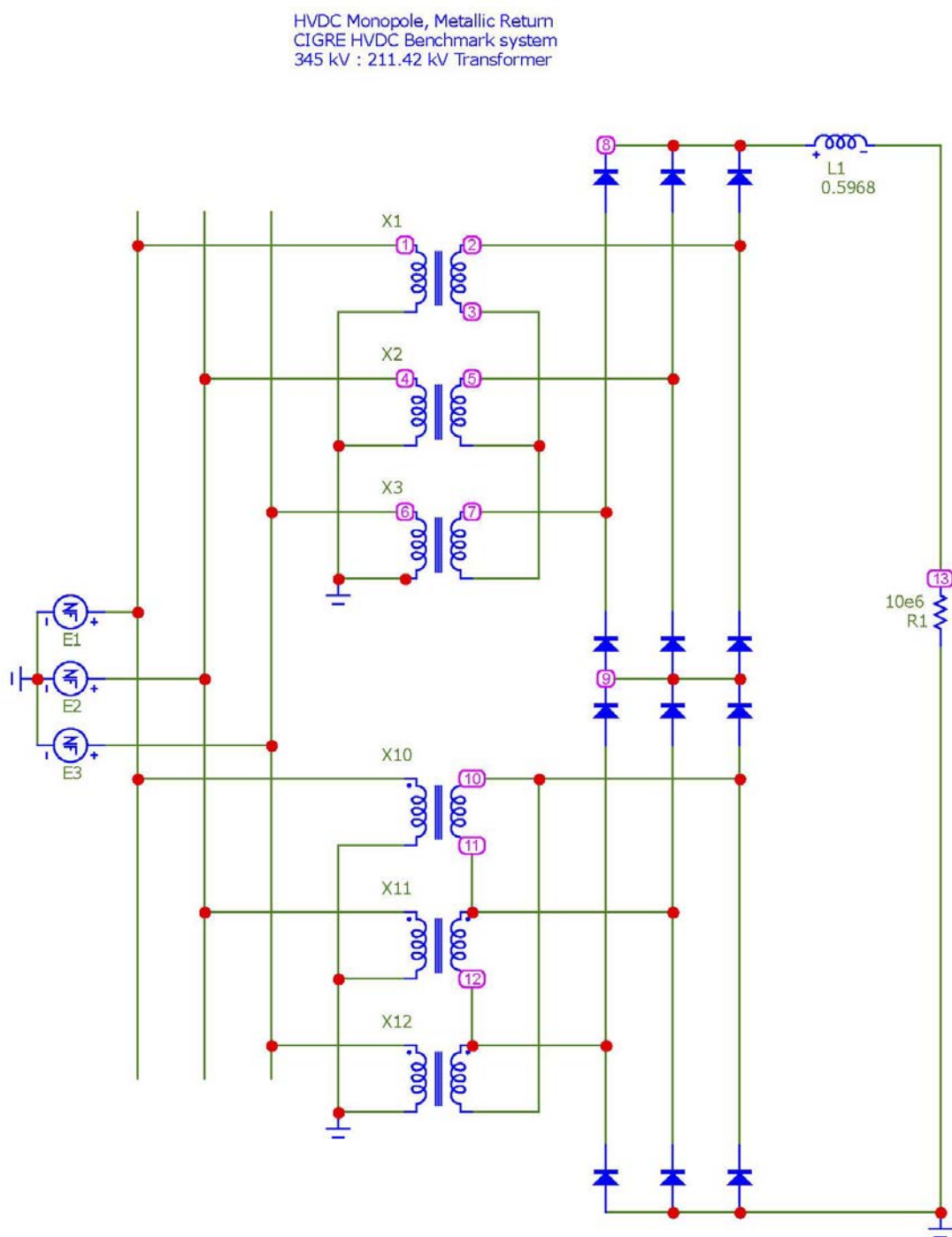


Рис. 8. Фрагмент моделі уніполярної передачі постійного струму з наявним другим металевим провідником

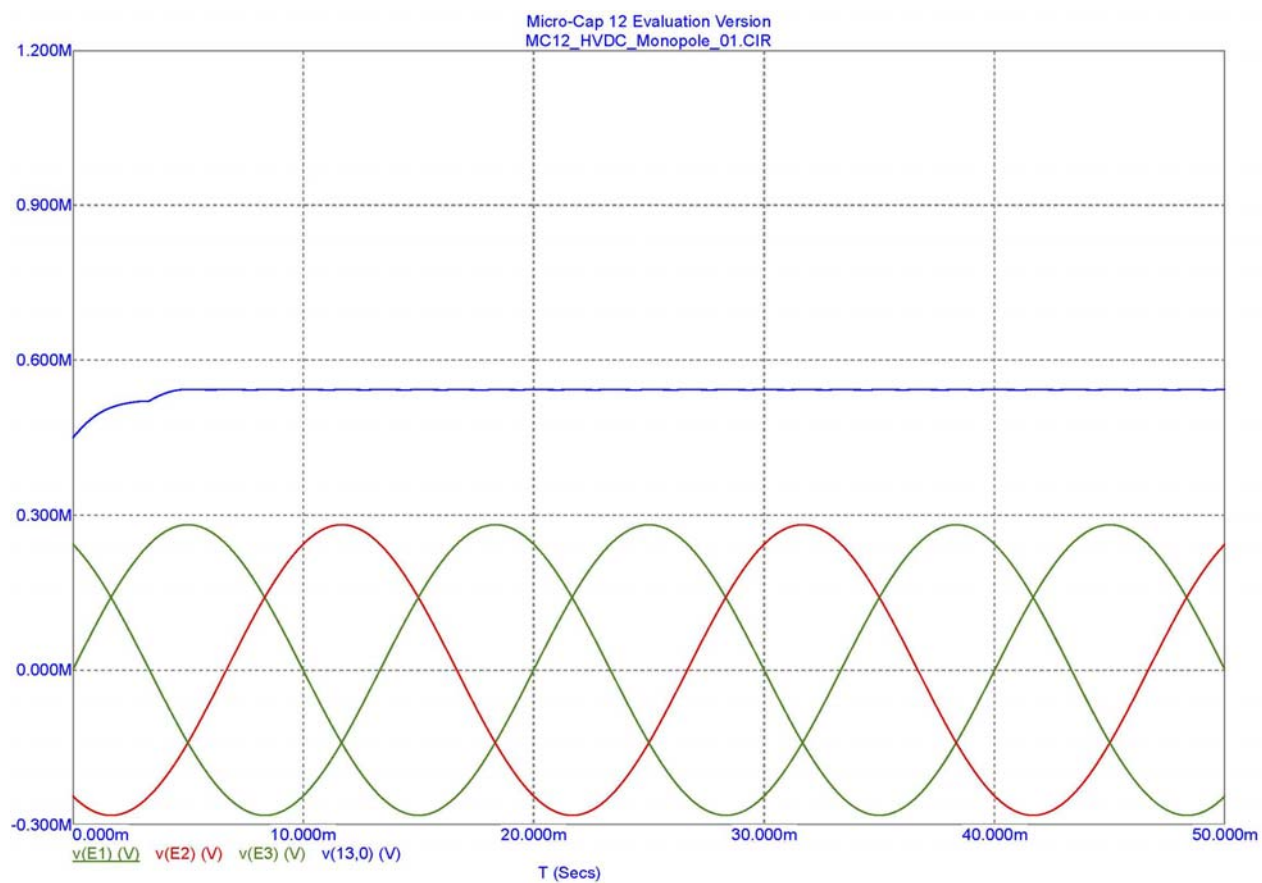


Рис. 9. Графіки напруги в схемі на рис. 8

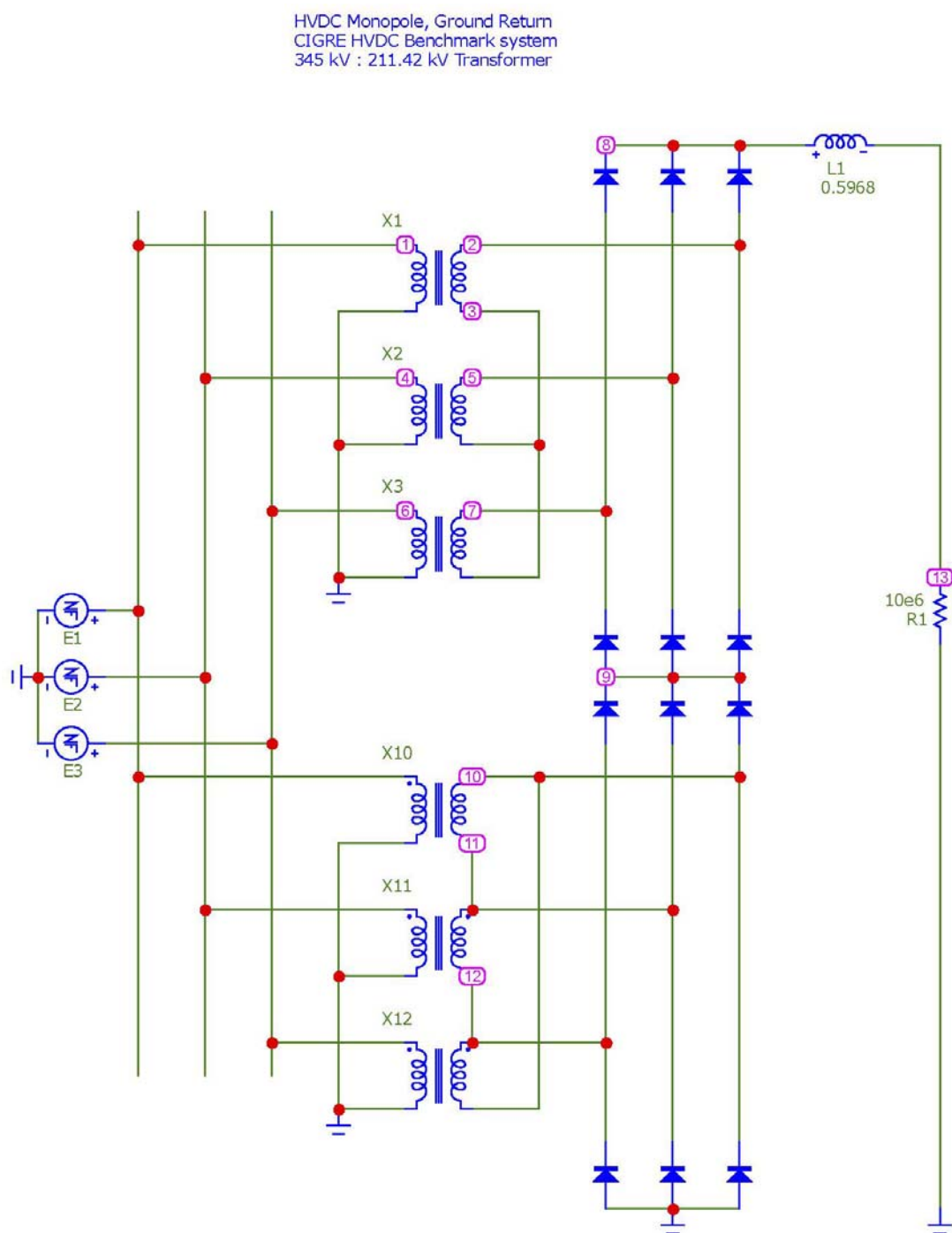


Рис. 10. Фрагмент моделі уніполярної передачі постійного струму без другого металевого провідника

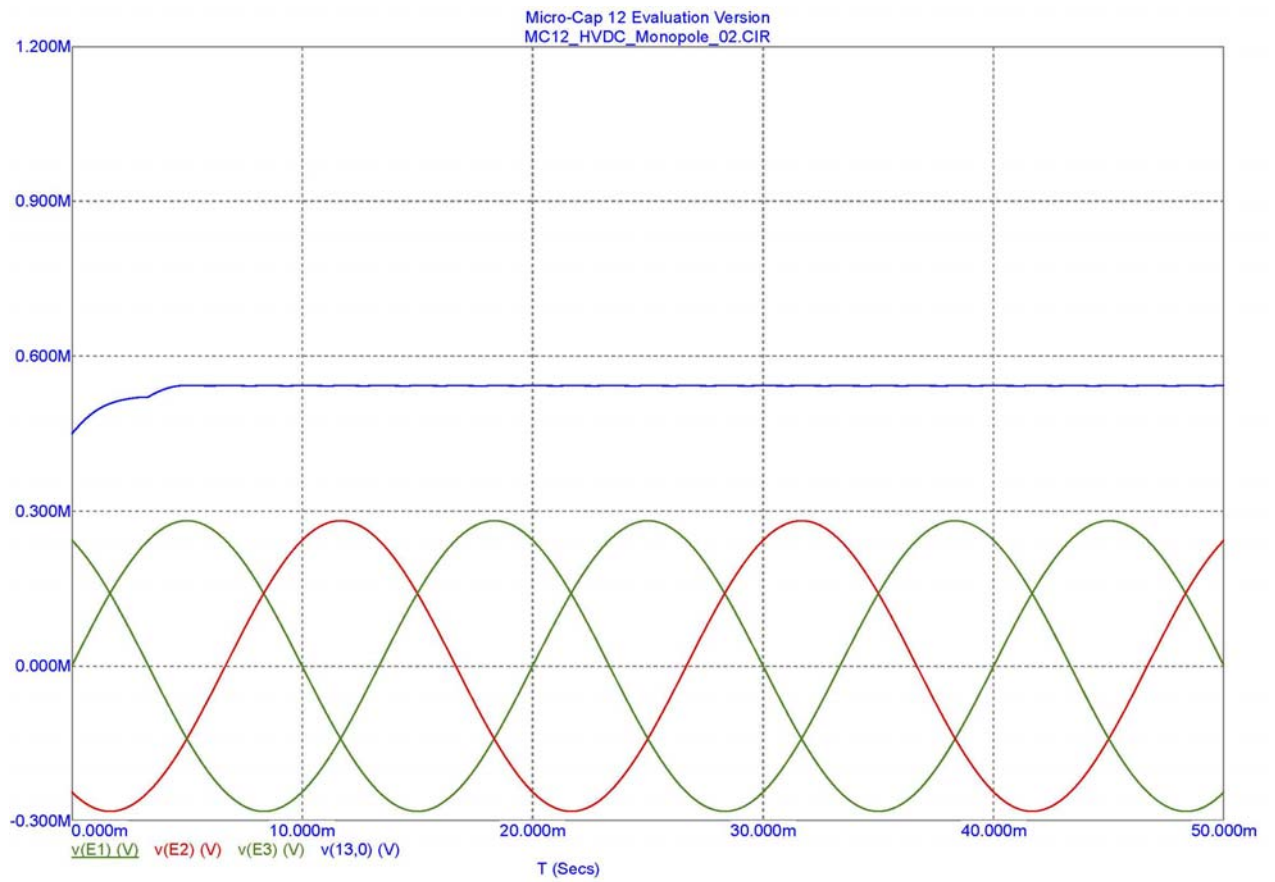


Рис. 11. Графіки напруги в схемі на рис. 10

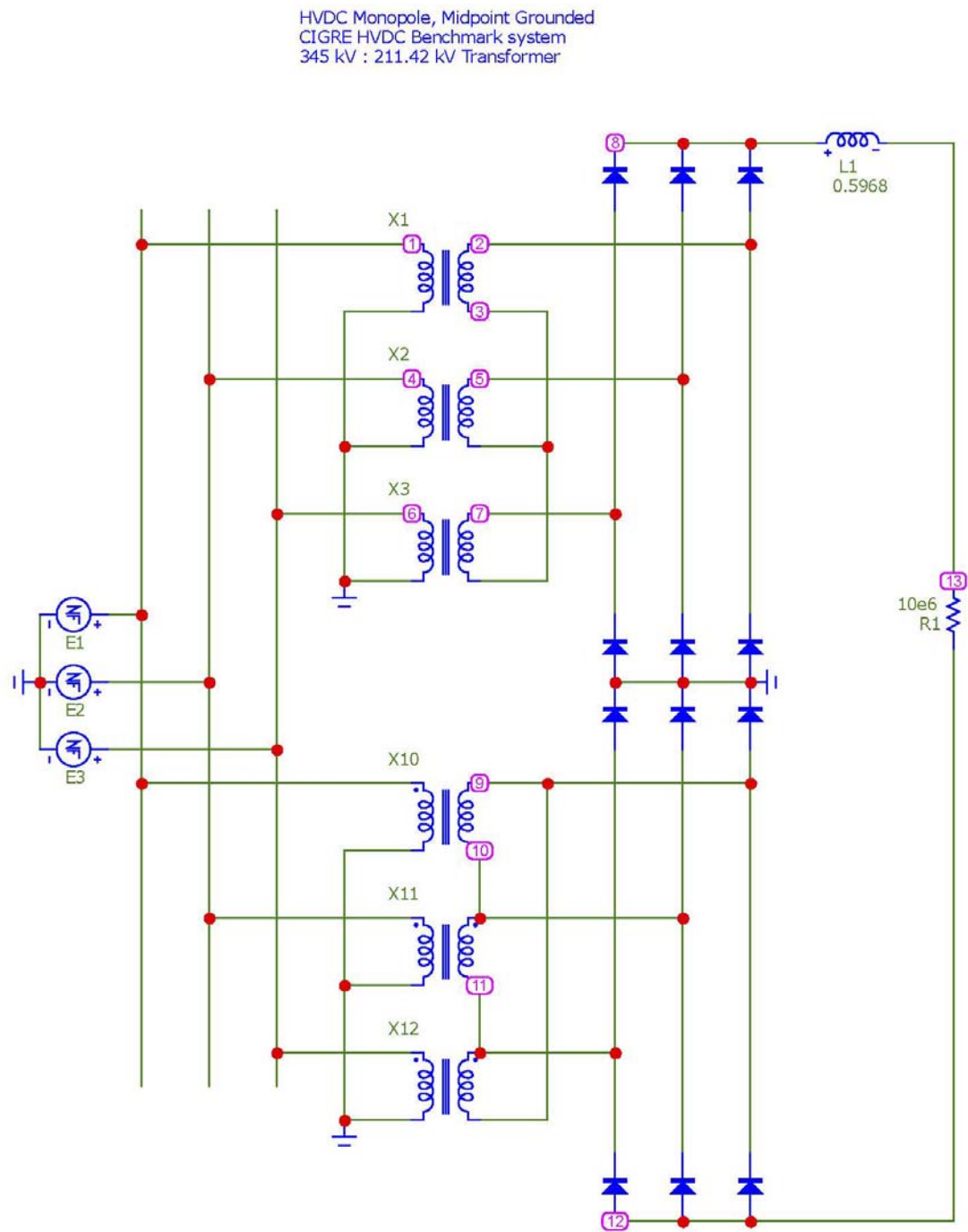


Рис. 12. Фрагмент моделі уніполярної передачі постійного струму із заземленою середньою точкою

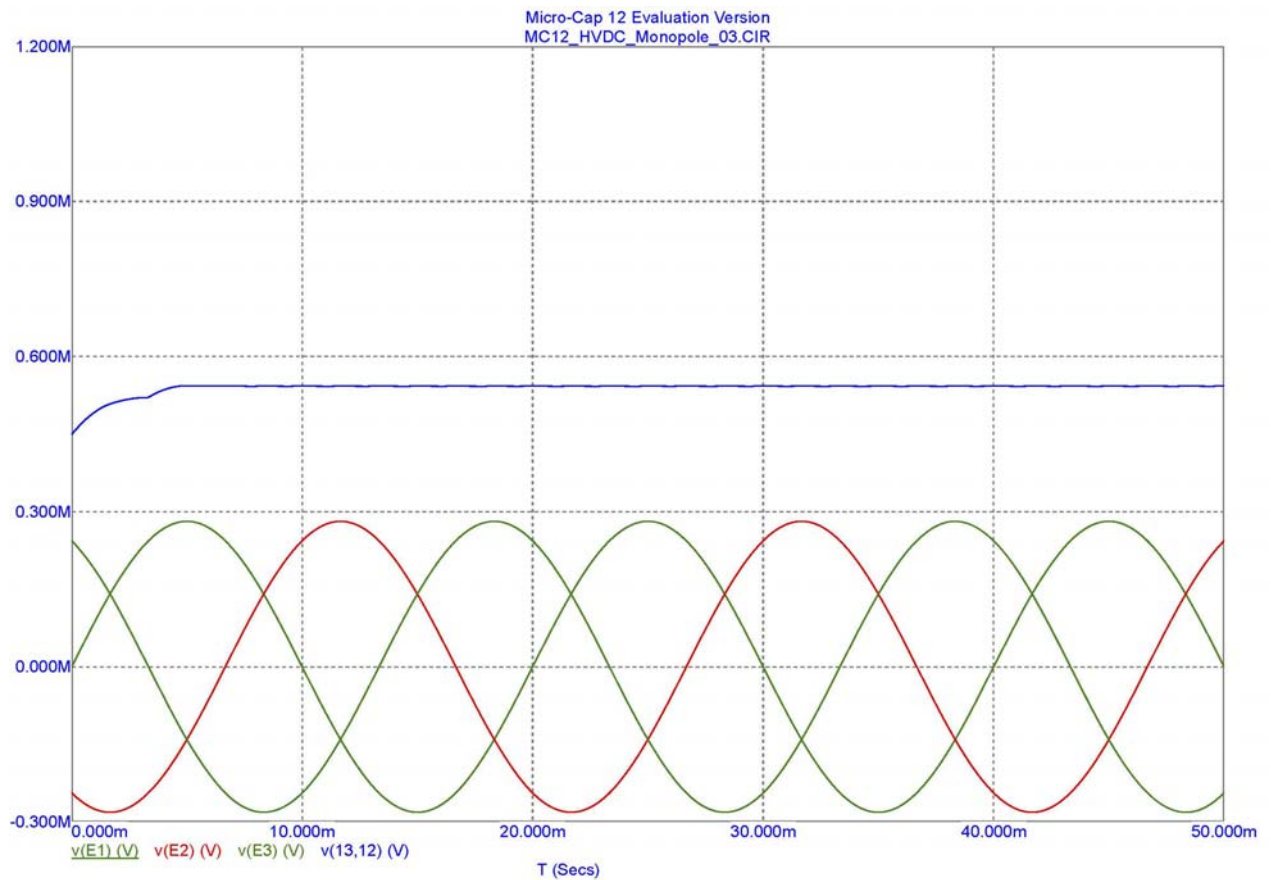


Рис. 13. Графіки напруги в схемі на рис. 12

Як ми бачимо на рис. 9,11 та 13, незалежно від типу заземлення передачі постійного струму, сама передача змін не зазнає і залишається однаковою.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Було розглянуто структурні схеми лінії постійного струму, основні схеми передачі та вставок постійного струму та кабельні лінії як основний елемент електричної передачі.
2. Розглянулась актуальність ліній електропередач постійного струму для різних країн світу, зокрема і Європи окремо. Перші кроки до будівництва світової супергريد були зроблені ще у 1882 році Німеччиною. І на даний час, згідно списку існуючих проектів ліній передачі постійного струму, західна Європа вважається основоположником даного глобального проекту.

3. Було виконано моделювання уніполярної передачі постійного струму з наявним другим металевим провідником, без наявного металевого провідника та заземленою середньою точкою. Дослідження показало, що заземлення уніполярної передачі постійного струму не залежить від виду її заземлення, та обирається згідно конструктивних, технологічних та інших міркувань.
4. Відсутність дослідження для порівняння біполярної схеми передачі постійного струму обумовлюється обмеженням можливостей моделювання у студентській версії Micro-Cap Evaluation Version.
5. Метою дослідження є аналіз процесу часткового розряду в ізоляції при напрузі постійного струму, виконання схемотехнічного моделювання за допомогою програмного забезпечення Micro-Cap Evaluation Version, розробка стенду для дослідження часткових розрядів при різних напругах, а також порівняння результатів досліджень отриманих фізично та віртуально. Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні завдання:
 - Створити схемотехнічну модель діелектрика з газовим включенням при частковому розряді.
 - Створити експериментальний стенд для фізичного дослідження утворення часткових розрядів в ізоляції.
 - Порівняти результати досліджень отриманих у фізичному випробуванні і схемотехнічному моделюванні та визначити можливість такої моделі якісно відтворювати результати реального дослідження.
 - Порівняти результати кількості утворення часткових розрядів при напрузі постійного та змінного струму однакового номіналу.
 - Створити схемотехнічну модель діелектрика з газовим включенням при частковому розряді.

- Створити експериментальний стенд для фізичного дослідження утворення часткових розрядів в ізоляції.
- Порівняти результати досліджень отриманих у фізичному випробуванні і схемотехнічному моделюванні та визначити можливість такої моделі якісно відтворювати результати реального дослідження.
- Порівняти результати кількості утворення часткових розрядів при напрузі постійного та змінного струму однакового номіналу.

2. УТВОРЕННЯ І РОЗВИТОК ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ В ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

2.1. Механізм утворення часткових розрядів при напрузі змінного струму

У процесі тривалої роботи при робочій напрузі відбувається погіршення фізико-хімічних характеристик ізоляції, що безпосередньо чи опосередковано призводить до підвищення діелектричних втрат, зниженню опору ізоляції і, в кінцевому підсумку, до її пробою. Основними факторами, що викликають старіння ізоляції, є виручкою часткові розряди, нагрів і зволоження.

Зміна характеристик ізоляції під дією часткових розрядів називається електричним старінням. Часткові розряди являють собою локальні пробої ослаблених ділянок ізоляції, якими є газові порожнини (бульбашки, мікроазори) в товщі діелектрика, або ж місцеві розряди в точках значного збільшення (посилення) електричного поля, наприклад на гострих краях електродів.

Газові бульбашки всередині твердого діелектрика можуть утворюватися при його усадці під час виготовлення або в результаті розтріскування в процесі роботи (наприклад, під дією вібрації, як це має місце в обертових машинах). Газові порожнини на поверхні, в яких можуть виникнути часткові розряди, являють собою вузькі щілини на краю електрода. Поверхня твердого діелектрика, прилеглого до газового включення, піддається впливу ЧР. Хоча енергія, що розсіюється при одиничному частковому розряді невелика, проте багаторазове їхнє повторення, поступово призводить до руйнування діелектрика.

Швидкість руйнування залежить від швидкості повторення часткових розрядів і яка енергія розсіювання в кожному одиничному ЧР.

Щоб встановити закономірності повторення ЧР і оточити енергію при кожному ЧР, можна скористатися схемою заміщення діелектрика з газовим включенням, показання на рис. 14. На цій схемі: C_B - ємність газового включення; C_6 - ємність ділянки діелектрика, включеного послідовно з газовим включенням:

C_a - ємність діелектрика без ділянки з газовим включенням; ИР - розрядник, що імітує пробою газового включення; R - опір каналу розряду, в якому розсіюється енергія.

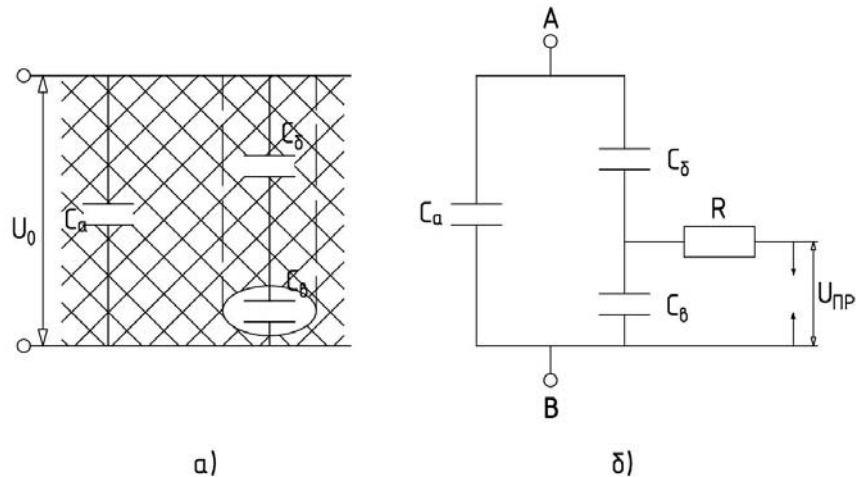


Рис. 14. Схема діелектрика з газовим включенням – а, та схема заміщення при ЧР – б

Нехай до ізоляції прикладена змінна напруга $u = U_0 \sin \omega t$, тоді напруга на газовому включенні становитиме:

$$u_B = U_0 \frac{C_b}{C_b + C_a} \sin \omega t \quad (7)$$

Якщо в момент напруга t_1 на газовому включенні досягне пробивного значення (рис. 15), то станеться перший ЧР. Ємність C_b виявиться зашунтовувати опором R , а напруга на ній буде зменшуватися, тобто ємність C_b буде розряджатися через канал розряду. Постійна часу контуру ($C_b - R$) мала, тому можна вважати, що процес розряду відбувається практично миттєво. При напрузі гасіння U_r канал розряду обривається і розрядження ємності C_b припиняється. Оскільки напруга джерела продовжує рости, то напруга на C_b знову збільшується і при досягненні $U_{пр}$ в момент t_2 виникає другий частковий розряд. Часткові розряди виникають до тих пір, поки напруга джерела не пройде максимальне значення. Після цього ЧР виникатимуть в другому півперіоді прикладеної напруги.

Виходячи із залежності на рис. 15, число ЧР за півперіод можна записати:

$$n = 2 \frac{u_{Bmax} - u_{\Gamma}}{u_{\text{пр}} - u_{\Gamma}} \quad (8)$$

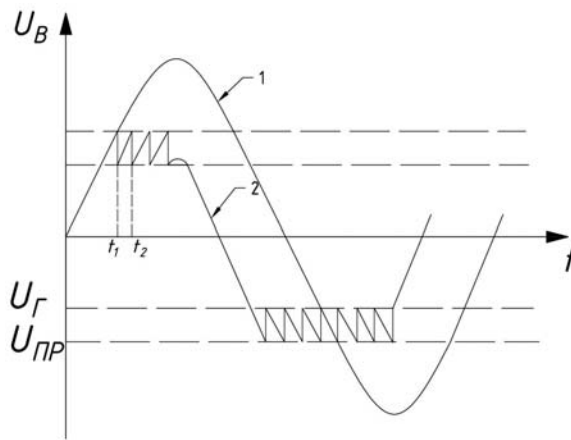


Рис. 15. Зміна напруги на газовому включенні: 1 – при відсутності часткових розрядів; 2 – при наявності ЧР

Тоді кількість ЧР на одиницю часу n_{\sim} складатиме:

$$n_{\sim} = 2nf = 4f \frac{u_{Bmax} - u_{\Gamma}}{u_{\text{пр}} - u_{\Gamma}} \quad (9)$$

Оскільки амплітуда прикладеної напруги $U_0 = u_{Bmax} \frac{C_6 + C_B}{C_6}$, напруга виникнення ЧР $U_{\text{пр}} = u_{\text{пр}max} \frac{C_6 + C_B}{C_6}$ і напруга гасіння ЧР $U_{\Gamma} = u_{\Gamma max} \frac{C_6 + C_B}{C_6}$, то вираз (10) можна записати як:

$$n_{\sim} = 4f \frac{U_0 - U_{\Gamma}}{U_{\text{пр}} - U_{\Gamma}} \quad (10)$$

Відомо, що $\frac{U_{\Gamma}}{U_{\text{пр}}} = \frac{u_{\Gamma}}{u_{\text{пр}}} = \eta = 0.5 \dots 0.8$. Тому:

$$n_{\sim} = 4f \frac{U_0 - \eta U_{\text{пр}}}{U_{\text{пр}}(1 - \eta)} \quad (11)$$

Із (11) слідує, що мінімально можливе число ЧР за одиницю часу складає $n_{\sim min} = 4f$. Помітимо, що при $f = 50$ Гц $n_{\sim min} = 200$ с⁻¹.

2.2. Механізм утворення часткових розрядів при напрузі постійного струму

Для визначення числа часткових розрядів при напрузі постійного струму використовується схема заміщення, представлена на рис. 16. В такому випадку

розподіл напруги на діелектрику, а також процеси розрядження та заряджання ємності газового включення визначаються не тільки ємностями, але й опорами витоку діелектрика R_δ і включення R_B .

При впливі на діелектрик постійної напруги U_0 та відсутності ЧР, напруга на газовому включенні в усталеному режимі дорівнювала б $u_B = U_0 \frac{R_\delta}{R_\delta + R_B}$. Якщо в момент $t = 0$ скачкоподібно прикласти напругу до електродів, то у газовому включенні виникне перший частковий розряд. Опір каналу розряду R досить малий, тому напруга на ємності включення C_B практично миттєво спадає до значення u_r і канал ЧР гасне.

Після цього ємність C_B буде заряджатися в відповідності з виразом:

$$u_{B,t} = u_B - (u_B - u_r)e^{-\frac{t}{T}} \quad (12)$$

$$T = \frac{R_\delta R_B}{R_\delta + R_B} (C_\delta + C_B)$$

Коли напруга на газовому включенні u_B досягає значення $u_{пр}$, виникне частковий розряд (рис. 17).

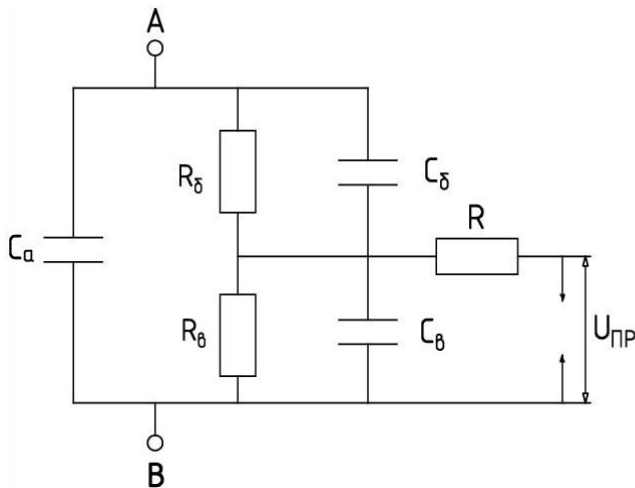


Рис. 16. Схема заміщення діелектрика з газовим включенням на постійній напрузі.

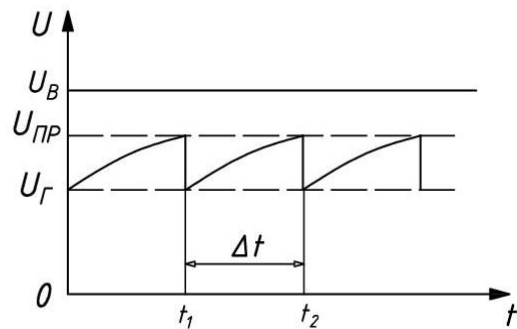


Рис. 17. Зміна напруги на газовому включенні при часткових розрядах на постійному струмі

З (12) слідує, що інтервали часу між частковими розрядами складають:

$$\Delta t = T \ln \frac{u_B - u_r}{u_B - u_{пр}} = T \ln \frac{U_0 - \eta U_{чр}}{U_0 - U_{чр}} \quad (13)$$

Відповідно, число ЧР за одиницю часу визначається виразом:

$$n_- = \frac{1}{T \ln \frac{U_0 - \eta U_{чр}}{U_0 - U_{чр}}} \quad (14)$$

Якщо прийняти $U_0 = 2,5 U_{чр}$ і врахувати, що для нормальної ізоляції постійна часу T складає десятки секунд, то відповідно до (14) отримуємо $n_- = 0.1 \text{ с}^{-1}$, а при однакових параметрах для змінної напруги отримаємо $n_- = 800 \text{ с}^{-1}$.

Таким чином, при однакових умовах роботи кількість ЧР на одиницю часу при змінній напрузі на декілька порядків переважає кількість ЧР при постійному струмі. Тобто ефект руйнування, що виробляє ЧР при постійній напрузі, значно менший, ніж при змінній. Тому в ізоляції, що працює при постійній напрузі, можуть бути допущені більш високі робочі напруженості електричного поля і товщина ізоляції при цьому може бути значно меншою, ніж при змінній напрузі.

Вимірявши $q_{чр}$ та $U_{чр}$ за (15) можна оцінити енергію часткових розрядів. Якщо $U_{чр}$ змінювати в діючих значеннях напруги ϕ для простоти прийняти $\eta = 0$, то оцінку $W_{чр}$ можна визначити:

$$W_{чр} = \frac{q_{чр} U_{чр}}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

Зв'язок між характеристиками ЧР і строком служби ізоляції поки не встановлений.

Поступове погіршення характеристик внутрішньої ізоляції при довготривалому нагріві називається тепловим старінням і виникає воно в результаті прискорення при підвищенні температури хімічних реакцій в діелектрику. Теплове старіння твердих діелектриків виявляється в їх зниженні механічної міцності, що може призвести до пошкодження ізоляції і її подальшого пробою. Теплове старіння рідких діелектриків виражається в

підвищенні їх прохідності і збільшенні діелектричних втрат, що, також, може привести до електричного або теплового пробою ізоляції.

Таблиця 2.

Нагрівостійкість електроізоляційних матеріалів (ГОСТ 8865-70)

Клас нагрівостійкості	$T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	Типи ізоляційних матеріалів
У	90	Непросочені і не занурені в рідкий діелектрик волокнисті матеріали з целюлози, бавовни або шовку
А	105	Просочені або занурені в рідкий діелектрик волокнисті матеріали з целюлози, бавовни або шовку
Е	120	Синтетичні органічні плівки
В	130	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна; що застосовуються з органічними сполуками і просочуваними змістуючими
F	155	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, що застосовуються в поєднанні з органічними сполуками і просочуваними змістуючими
Н	180	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, що застосовуються в поєднанні з кремнійорганічними сполучниками і просочуваними змістуючими, кремнійорганічні еластомери
С	> 180	Слюда, кераміка, скло, кварц, що застосовуються без сполучних змістуючих або з неорганічними або елементоорганічними зв'язуючими сумішами

Швидкості хімічних реакцій, як відомо, при збільшенні температури на 10°C підвищуються в 2-4 рази. Тому термін служби ізоляції при тепловому старінні залежить від її температури в умовах експлуатації. Щоб забезпечити необхідну довговічність ізоляції, встановлені гранично допустимі температури $T_{\text{доп}}$, які залежить від типу ізоляційних матеріалів (табл. 2). Електричні машини і апарати

повинні конструюватися таким чином, щоб в номінальному режимі температура в найбільш нагрітому місці не перевищувала допустиму.

Зволоження внутрішньої ізоляції призводить до зростання провідності і збільшення діелектричних втрат, оскільки волога разом з іншими забрудненнями може утворювати слабкі електроліти, в яких в результаті дисоціації молекул утворюються іони. Таким чином; зволоження ізоляції призводить до збільшення її нагрівання і підвищенню швидкості теплового старіння. При постійній напрузі збільшення провідності ізоляції викликає різке підвищення інтенсивності часткових розрядів (зменшується постійна часу в формулах (12) і (14)).

Щоб запобігти або обмежити зволоження ізоляції, застосовують герметичні ізоляційні конструкції, виробляють просочення волокнистих матеріалів гідрофобними складами лакування. Зовнішніх поверхонь твердої ізоляції, виконаної з органічних матеріалів на основі целюлози.

Старіння мінерального масла відбувається в основному через окислювальних процесів, при яких воно розкладається з утворенням води, смол, газів і нерозчинних опадів-шламу. Шлам є каталізатором, і при його появі швидкість окислення збільшується.

Подовження терміну служби масла може бути досягнуто, насамперед, запобіганням масла від дотику з киснем повітря. У конденсаторах, кабелях, деяких типах вводів забезпечується повна герметизація масла, завдяки чому воно працює практично необмежений час. Силові трансформатори та апарати, що містять великі обсяги масла, забезпечуються розширювальними бачками, в яких простір між поверхнею масла і стінкою заповнюється азотом.

Для зниження швидкості старіння масла до нього додають також спеціальні речовини, називані шнейбіторами, які легко поглинають кисень і тим самим захищають масло від окислення.

Швидкість старіння масла можна зменшити безперервної очищенням його при експлуатації. Для цього трансформатор постачають термосіфонним фільтром,

через який відбувається конвекція масла. У фільтр поміщається силікагель - висушений проколюванням гель двоокису кремнію SiO_2 (1% від маси масла), який являється хорошим адсорбентом. Він поглинає воду та інші продукти розкладання масла, а також затримує механічні домішки. Згодом актуальність адсорбенту знижується і його треба замінювати.

2.3. Огляд перших публікацій з дослідження часткових розрядів при напрузі постійного струму

У жовтні 1995 року була опублікована стаття [33] метою дослідження якої був огляд часткових розрядів при напрузі постійного струму. Представлена модель описувала процес стохастичного розряду та експериментально підтверджена для внутрішніх розрядів і корони у повітрі. Крім того, обговорювалася класифікація моделей розряду. Також була запропонована 3-мірна гістограма, що описувала кількість розрядів залежно від величини викиду та часу до наступного розряду, як основу для розпізнавання розряду на постійній напрузі.

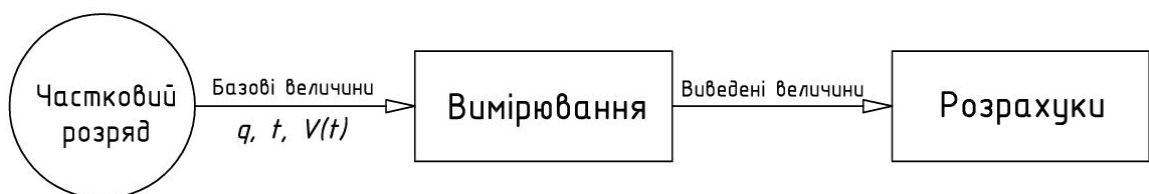


Рис. 18. Схема дослідження параметрів часткового розряду

Як правило, частковий розряд визначається шляхом об'єднання струму зміщення в провідниках об'єкта випробування, де вимірюване значення це заряд у пКл. Було доведено, що три основних величини розряду, а саме заряд розряду q_j , час виникнення t_1 та миттєву напругу $V(t_1)$ на тестовому об'єкті можна пов'язати з виникненням розряду. Якщо ж форма напруги відома, то кількість

базових величин можна зменшити. Виконавши деяку систему вимірювання можна дослідити ці величини.

Модель часу затримки/відновлення була розроблена для опису поведінки дефектних розрядів з єдиним місцем викиду (утворення). Його можна використовувати для вивчення властивостей розряду на основі статистичних вимірювань. Проте, для цілей практичної класифікації його не слід використовувати, оскільки його застосування обмежується кількома особливими випадками. Для класифікації ЧР застосовується більш загальний підхід. Основний принцип діагностики імпульсів полягає в тому, що на тестувальному об'єкті можна виміряти імпульси характеристики усіх імпульсів, що генерує джерело живлення. Порівнюючи «відбиток» від невідомих дефектів з «відбитком» від відомих дефектів, перший може бути легко розпізнаний.

Основною метою [23] ж було дослідження властивостей утворення стримера та властивостей розбивання мінеральної оливи та синтетичної ефірної рідини під напругою постійного струму до 100 кВ. Для спостереження за впливом радіуса кінця на початок стримера використовували конфігурацію електродів з точковими площинами з фіксованою щільністю. Результати показали, що напруга ініціювання синтетичної ефірної рідини є трохи нижчою, ніж у мінеральних масел, для всіх радіусів кінцевих зон при позитивній та негативній полярності. Крім того, синтетична ефірна рідина має нижчі напруги пробою, ніж мінеральна олива, для всіх відстаней зазорів як при позитивній, так і негативній полярностях. Через можливий шум у силовому струмі, випромінюваний світловий сигнал, що відповідає поточному сигналу був використаний для підтвердження початку стримера. Під позитивною полярністю струми та випромінювані світлові сигнали були більш інтенсивними і склалися з безперервного струму з великими дискретними імпульсами. Під негативною полярністю, як для поточного, так і світлового сигналів, зазвичай був виявлений один сигнал.

Причиною є те, що при позитивній полярності концентрація позитивних зарядів підвищує граничне поле в голові зарядової хмари, що сприяє поширенню стримеру, а потім послаблює напругу пробою. Проте розряджені відсічні мінусові заряди, подібно до екрану негативного наконечника, ослаблюють крайове поле, що уповільнює розповсюдження стримера, а потім збільшує негативну напругу пробою.

Основним завданням [28] було виконати дослідження, що характеризує сигнали акустичної емісії, вироблені внаслідок часткових розрядів під напругою змінного та постійного струму, в ізоляції трансформаторного масла. Зрозуміло, що сигнали АЕ, що утворюються внаслідок часткових розрядів під напругою змінного та постійного струму різні. Сигнал акустичної емісії, який генерується через напругу змінного струму, має довготривалі імпульси в порівнянні з напругою постійного струму. Час амплітуди, тривалість підйому, кількість, тривалість та енергетичний вміст сигналу АЕ, вироблені через часткове розрядження при позитивному постійному струмі, є високими в порівнянні з негативними напругами постійного струму.

Було відзначено, що незалежно від напруги, інтенсивність акустичного сигналу, викликаного дією часткового розряду змінюється в часі, що власне, вказує на однаковість цієї величини у всі моменти часу, а отже активність часткового розряду в ізоляційному проміжку – це досить переривчастий процес.

2.4. Висновки до розділу 2

1. Було дослідження механізм утворення часткових розрядів при напрузі змінного струму у трьох-ємнісній схемі заміщення діелектрика з газовим включенням. Часткові розряди у такій схемі виникатимуть у перший півперіод прикладеної напруги до тих пір, поки напруга джерела не пройде

максимум свого значення, після чого ЧР утворюватимуться у другому півперіоді напруги.

2. Як показав математичне дослідження, мінімально можливе число ЧР за одиницю часу складає 200 с^{-1} .
3. Було дослідження механізм утворення часткових розрядів при напрузі постійного струму тієї ж схеми заміщення. Суттєва відмінність між розглянутими схемами у тому, що на відміну від схеми заміщення при змінній напрузі, при постійній розрядження та зарядження ємності газового включення визначається не тільки ємностями, але й опорами витoku діелектрика і включення.
4. Якщо прийняти умови дослідження кількості утворення часткових розрядів рівними для постійної та змінної напруги (наприклад $U_0 = 2,5U_{\text{чр}}$), то кількість ЧР при постійній напрузі складатиме $n_- = 0.1 \text{ с}^{-1}$, а змінній – $n_+ = 800 \text{ с}^{-1}$, що показує різницю у нанесенні руйнування ізоляції високовольтного обладнання.
5. Проаналізовано дослідження, що характеризують сигнали акустичної емісії при змінній та постійній напругах. Сигнали АЕ для змінної напруги мають дещо довшу тривалість, аніж постійної напруги. При цьому слід зазначити, що Час фронту, кількість часткових розрядів та тривалість розряду при негативній мають менші значенні ніж при позитивній постійній напрузі.

3. СХЕМОТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ ПРИ НАПРУЗІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1. Вибір способу моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму

Діагностика стану ізоляції, а саме вимірювання часткових розрядів як неруйнівного контролю ізоляції, завжди відігравала важливу роль в електроенергетиці. Виявлення та завчасне запобігання їх руйнівного впливу значно полегшило б експлуатацію високовольтного обладнання.

В [31] запропоновано один із методів виявлення часткових розрядів. Згідно [22] була обрана пряма схема виявлення часткових розрядів, що вважається більш простою для реалізації. В залежності від мети вимірювання та виду контролю ізоляції, структуру даної електричної схеми можна змінювати. Для дослідження часткових розрядів при різних напругах була застосована трьох-ємнісна схема заміщення (рис. 19), удосконалення схеми із роботи [20]. Відмінною особливістю даної схеми є те, що авторами було проведено зіставлення результатів фізичного і схемотехнічного моделювання часткових розрядів.

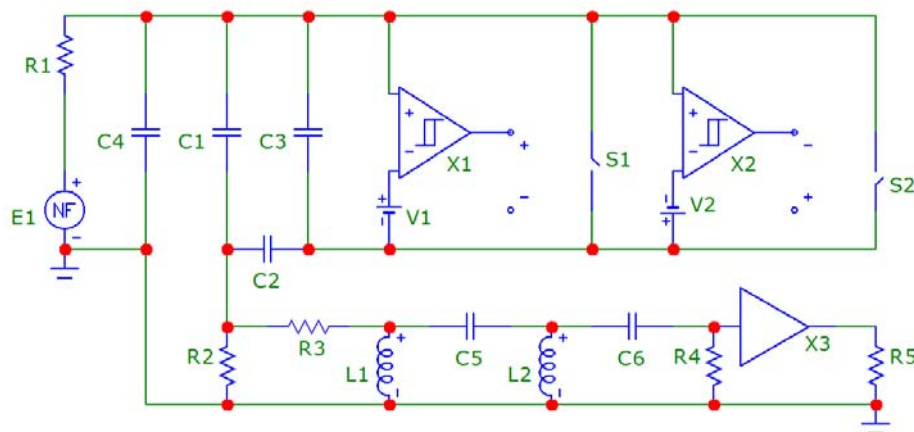


Рис. 19. Моделювання системи знаходження часткових розрядів

Для досліджень на кафедрі Техніки і електрофізики високих напруг Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» була зібрана експериментальна установка,

високовольтна частина якої складалася з підвищувального трансформатора, з'єднувального конденсатора, кіловольметра та електродного пристрою. Принцип дії цієї схеми неодноразово описаний в [33; 21], і тому в [31] не розглядався.

Об'єкт фізичного моделювання часткових розрядів - це міжелектродний проміжок, що складається з двох співвісних циліндричних електродів та електротехнічний картон між ними. Товщина картону рівна 2,3 мм, а циліндричні електроди мають діаметри 10 мм верхній та 70 мм нижній. Висока напруга прикладалася до електроду меншого діаметру. Як реєстратор імпульсів використовувався цифровий осцилограф, що через USB-інтерфейс з'єднувався з персональним комп'ютером. Приклад отриманої осцилограми показаний на рис. 20.



Рис. 20. Осцилограма часткових розрядів, отриманих в фізичному експерименті.

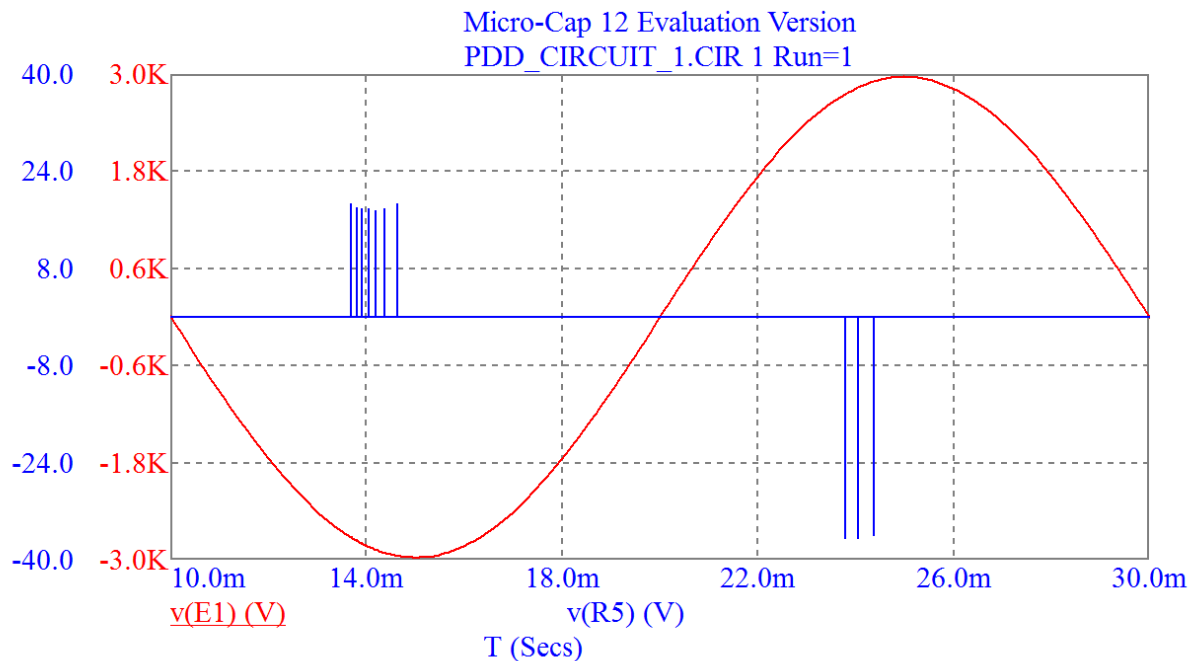


Рис. 21. Осцилограмма часткових розрядів отримана за допомогою Micro-Cap Evaluation Version

У наведеному прикладі моделювання використовувалося лише одне газове включення, коли у фізичному експерименті газових включень декілька (порожнини електротехнічного картону). Тому для моделювання декількох мікрровключень, автори пропонують паралельне з'єднання декількох трьох-ємнісних схем.

В [30] був проведений аналіз часткових розрядів при впливі гармонік напруги. Об'єктом даного дослідження є сам розряд та вплив несинусоїдної напруги на нього. Основною метою є аналіз залежності частоти проходження імпульсів ЧР через ізоляцію із впливом частоти основної гармоніки та наступних 2-30-ї.

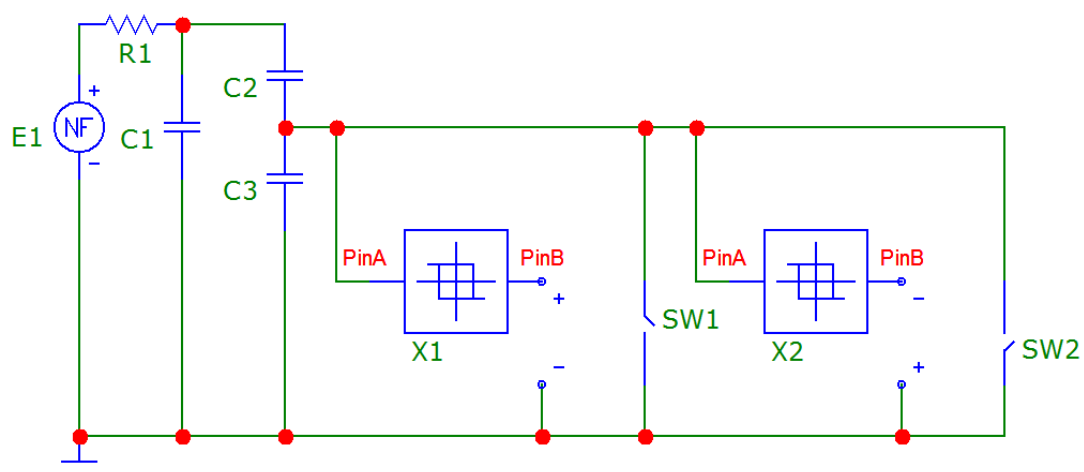
Результати дослідження показали, що спотворення синусоїдальної напруги в залежності від амплітуди сигналу має досить суттєвий вплив на появу часткових розрядів в ізоляції електроустаткування.

Аналогічно [31] для моделювання була обрана трьох-ємнісна схема моделювання часткових розрядів. Вона являється відносно простою в реалізації, схемотехнічне моделювання було підтверджене фізичним дослідом на кафедр

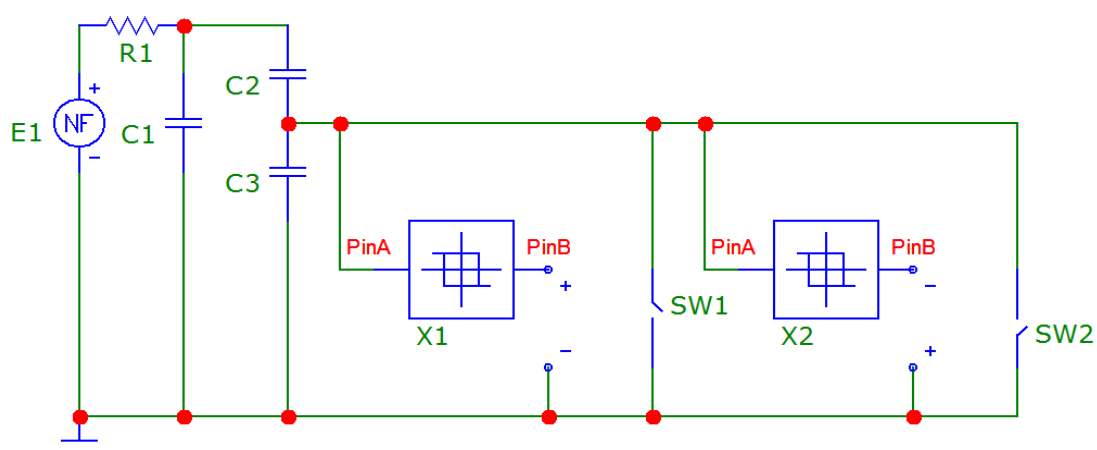
Аналогічним чином як і у [31] спостереження показало, що трьох-ємнісна схема ефективна у дослідженні часткових розрядів, являється відносно простою в реалізації у схемотехнічному моделюванні та у фізичному його відтворенні. Моделювання було підтверджене фізичним дослідом на кафедрі Техніки та електрофізики високих напруг Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за допомогою індукційного тороїдального еталонного трансформатора напруги на який подавали спотворений сигнал синусоїдальної напруги, схожий до реального сигналу мережі. Результат показав, що гармоніки напруги впливають на кількість і форму часткових розрядів.

Робота [21] вважається першою публікацією, присвяченою моделювання часткових розрядів в ізоляції з газовим включенням. У цій же роботі представлена ємнісна схема заміщення діелектрика з газовим включенням. Коротка історія подальших модифікацій ємнісний схеми заміщення діелектрика з газовим включенням при частковому розряді дана в [24]. Базуючись на ці публікації, в [29] проведено схемотехнічне моделювання іонізаційного пробою твердого діелектрика з частковим розрядом у газовому включенні.

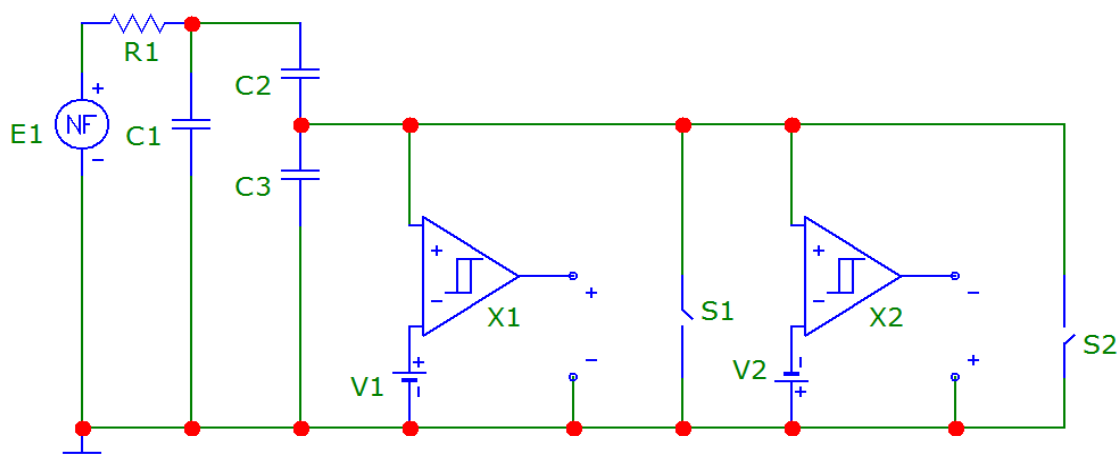
Запропоновано декілька способів схемотехнічного моделювання пробою газового включення при частковому розряді (рис. 22)



(a)



(б)



(в)

Рис. 22. Моделювання діелектрика з газовим включенням при частковому розряді з використанням: а) тригера Шмітта і ключа, керованого напругою;

б) компаратора напруги з гістерезисом і ключа, керованого напругою з гістерезисом; в) компаратора напруги з гістерезисом і ключа, керованого напругою з гістерезисом, а також джерела опорної напруги

На рис. 22 E_1 – функціональний джерело напруги; R_1 – внутрішній опір джерела напруги; C_1 – ємність діелектрика, без ділянки з газовим включенням; C_2 – ємність ділянки діелектрика, включеного послідовно з газовим включенням; C_3 – ємність газового включення. Інші елементи моделюють розрядник, що імітує пробою газового включення. Ці елементи перераховані нижче.

На рис. 22, а, X_1, X_2 – тригери Шмітта; SW_1, SW_2 - ключі, керовані напругою.

На рис. 22, б і рис. 22, в, X_1, X_2 - компаратори напруги з гістерезисом; S_1, S_2 – ключі, керовані напругою з гістерезисом.

На рис. 22, в, V_1, V_2 – джерела опорної напруги. У схемах прийнято, що опір ключів в розімкнутому стані становить 100 МОм, а в замкнутому 1 Ом. Внутрішній опір джерела напруги становить 1 Ом.

Схеми на рис. 22 відображають різні підходи до схемотехнічному моделювання пробою. Зокрема, схема на рис. 22, а відповідає підходу, запропонованого в [11], а схема, на рис. 22, б і рис. 22, в відповідають підходу, запропонованого в [18, 32].

Перед основним дослідженням було проведено попереднє дослідження впливу змінної напруги при частковому розряді. Результати показали, що навіть при незначному нелінійному спотворенні напруги, форма часткових розрядів також змінюється.

Результати впливу імпульсу напруги на об'єкт показані на рис. 23 та рис. 24

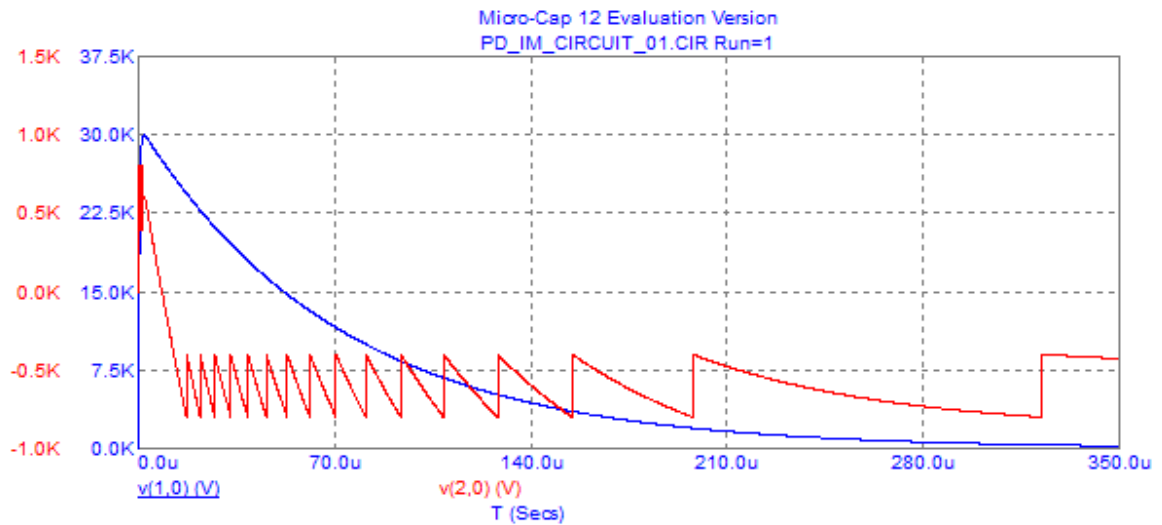


Рис. 23. Часткові розряди при впливі грозового імпульсу напруги формою 1,2/50 мкс

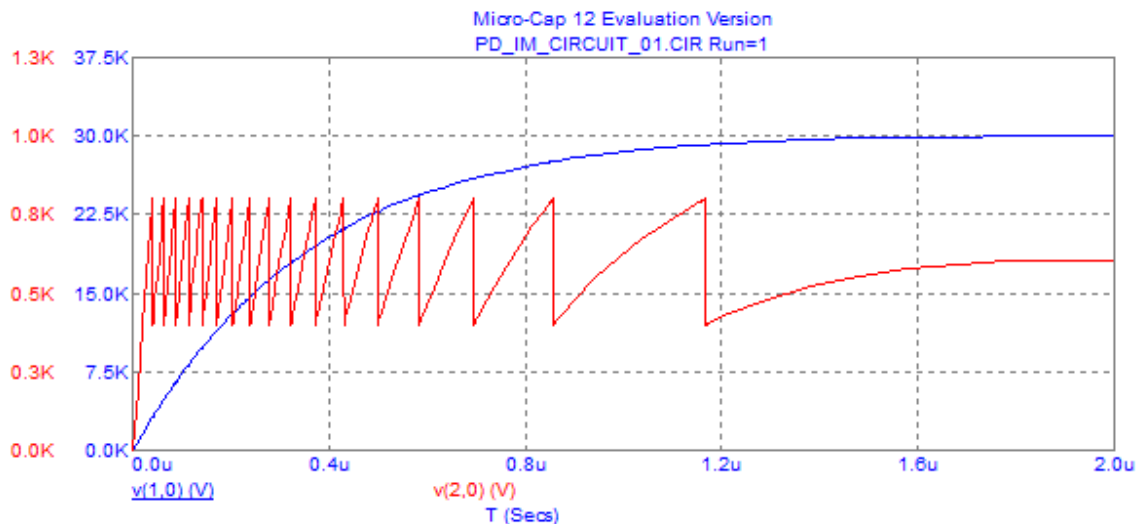


Рис. 24. Часткові розряди при впливі грозового імпульсу напруги формою 1,2/50 мкс (збільшена область фронту імпульсу)

Як видно з рис. 23, на фронті імпульсу виникають часткові розряди позитивної полярності, а на спаді – негативної.

В порівнянні з [31] бачимо, що при впливі імпульсів напруги, на відміну від синусоїдальної, в зразках ізоляції різко зростає інтенсивність часткових розрядів, як в області фронту, так і на спаді імпульсу.

Як ми можемо бачити, часткові розряди – це негативне явище, що призводить до прискореного старіння ізоляції. А в залежності від форми і амплітуди напруги несе різні, але негативні наслідки для ізоляції виковольтного обладнання.

Трьох-ємнісна схема, що застосовувалася для моделювання часткових розрядів досить широко використовується для досліджень часткових розрядів зазнаючи різних інтерпретацій та змін, не втрачаючи своєї основної задачі. Схемотехнічне дослідження в роботах [31-33] проводилося із застосуванням функціонального джерела напруги у даних моделях. Змінивши вид напруги та удосконаливши схему дані схеми можуть бути використані для моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму.

3.2. Схемотехнічне моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму за допомогою Micro-Cap Evaluation Version

3.2.1. Моделювання часткових розрядів при ідеальній напрузі постійного струму

За основу моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму була обрана трьох-ємнісна схема заміщення часткових розрядів описана в підрозділі 3.1. магістерської дисертації. Оскільки дослідження [31-33] проводилися за допомогою змінної напруги, основним завданням стало удосконалення даної схеми для схематехнічного моделювання при постійній напрузі. Таким чином, ціль була досягнута за допомогою приєднання в схему опору витoku діелектрика згідно [9], а також аналогового сигналу функціонального джерела напруги з основною гармонікою напруги амплітудою $E_1 = E_0 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 10 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{ кВ}$, що відповідає амплітудному значенню першої гармоніки неспотвореної кривої напруги [31].

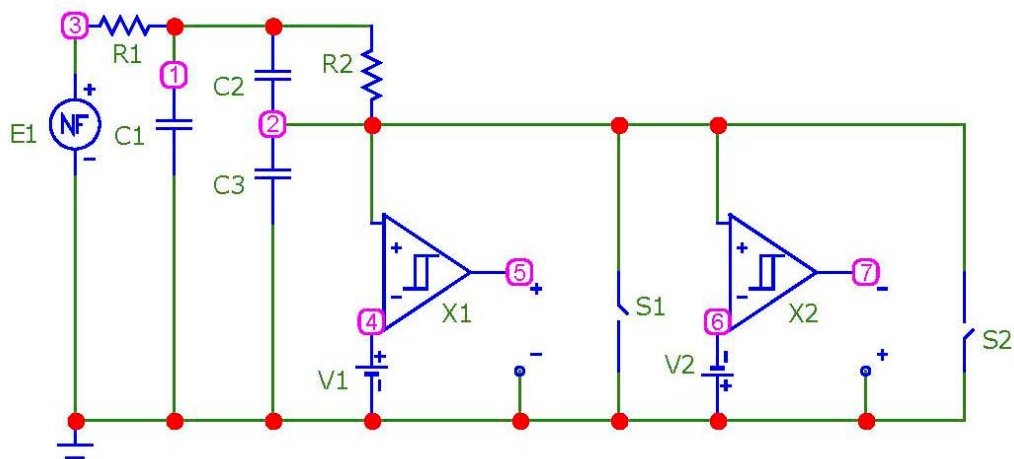


Рис. 25. Моделювання діелектрика з газовим включенням при частковому розряді з використанням компаратора напруги з гістересом і ключа, керованого напругою з гістерезисом, а також функціонального джерела напруги

На рис. 25 E_1 – джерело напруги, що має як основну частоту, так і представляє суму гармонік напруги; R_1 – внутрішній опір джерела напруги; R_2 – опір витoku діелектрика; C_1 – ємність діелектрика, без газового включення; C_2 – ємність ділянки діелектрика, включеного послідовно з газовим включенням; C_3 – ємність газового включення; X_1 , X_2 – компаратори напруги з гістерезисом; S_1 , S_2 – ключі, керовані напругою з гістерезисом; V_1 , V_2 – джерела опорної напруги. Елементи моделі S_1 , S_2 , X_1 , X_2 являють собою розрядник, імітуючий пробій газового включення.

Обрані параметри схеми: $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 340 \cdot 10^6, 900 \cdot 10^6, 9 \cdot 10^9, 90 \cdot 10^9 \text{ Ом}$; $C_1 = 50 \text{ пФ}$; $C_2 = 2 \text{ пФ}$; $C_3 = 6 \text{ пФ}$; $V_1 = V_2 = 600 \text{ В}$; опір ключів S_1 та S_2 у розімкненому стані становить 10 ГОм , а замкненому 100 Ом .

Параметри R_2 вибиралися згідно вимірювань опору зволоженого та сухого електротехнічного картону на кафедрі Техніки та електрофізики високих напруг Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за допомогою тераомметра. Вимірювання показали, що опір сухого картону становить 90000 МОм , а зволоженого 340 МОм .

Оскільки проміжні параметри – це різні ступені зволоження картону і отримати їх експериментально досить складно, для моделювання дані точки обиралися самостійно і досліджувалися безпосередньо лише за допомогою програмного забезпечення.

Результати моделювання

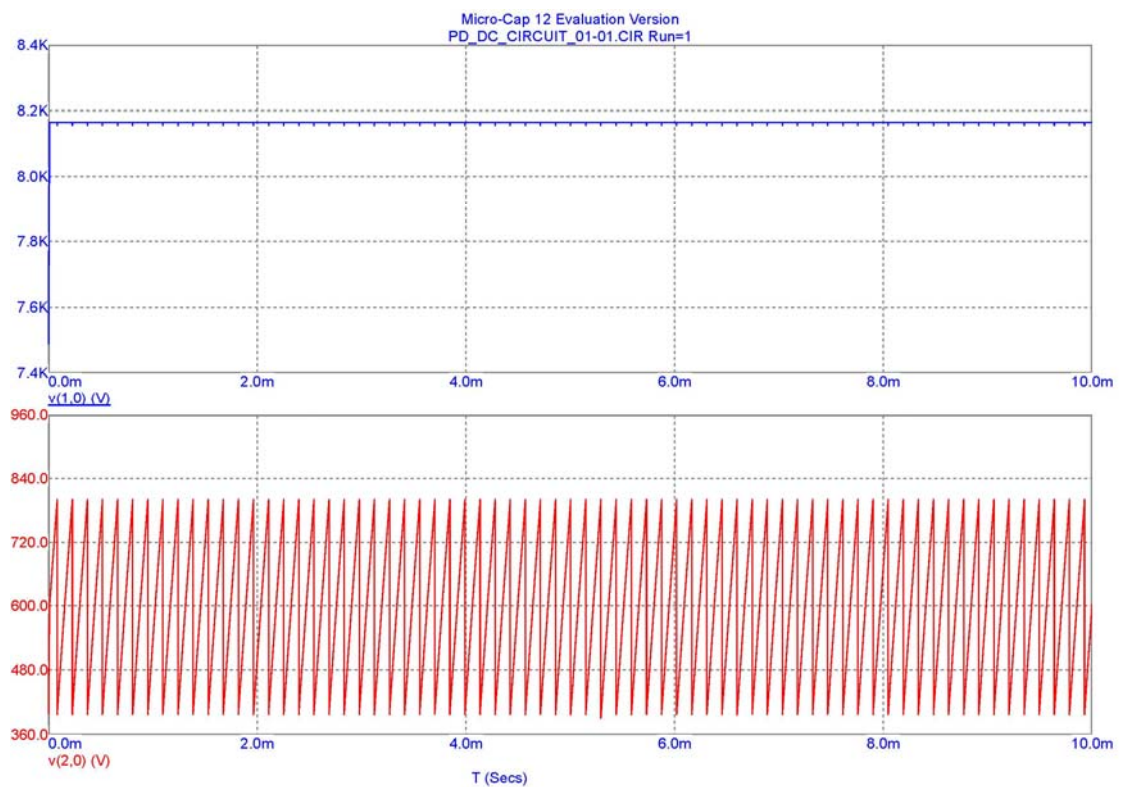


Рис.26. Часткові розряди при $R_2 = 340$ МОм

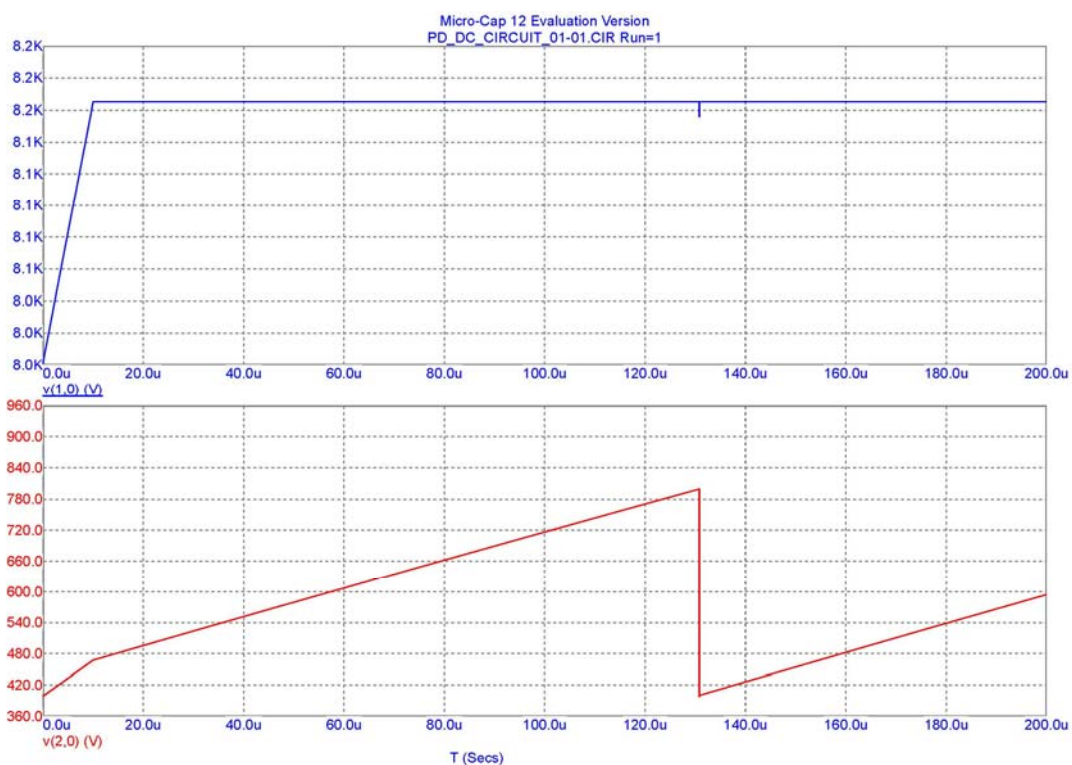


Рис. 27. Часткових розрядів при $R_2 = 340$ МОм (збільшено фронт імпульсу)

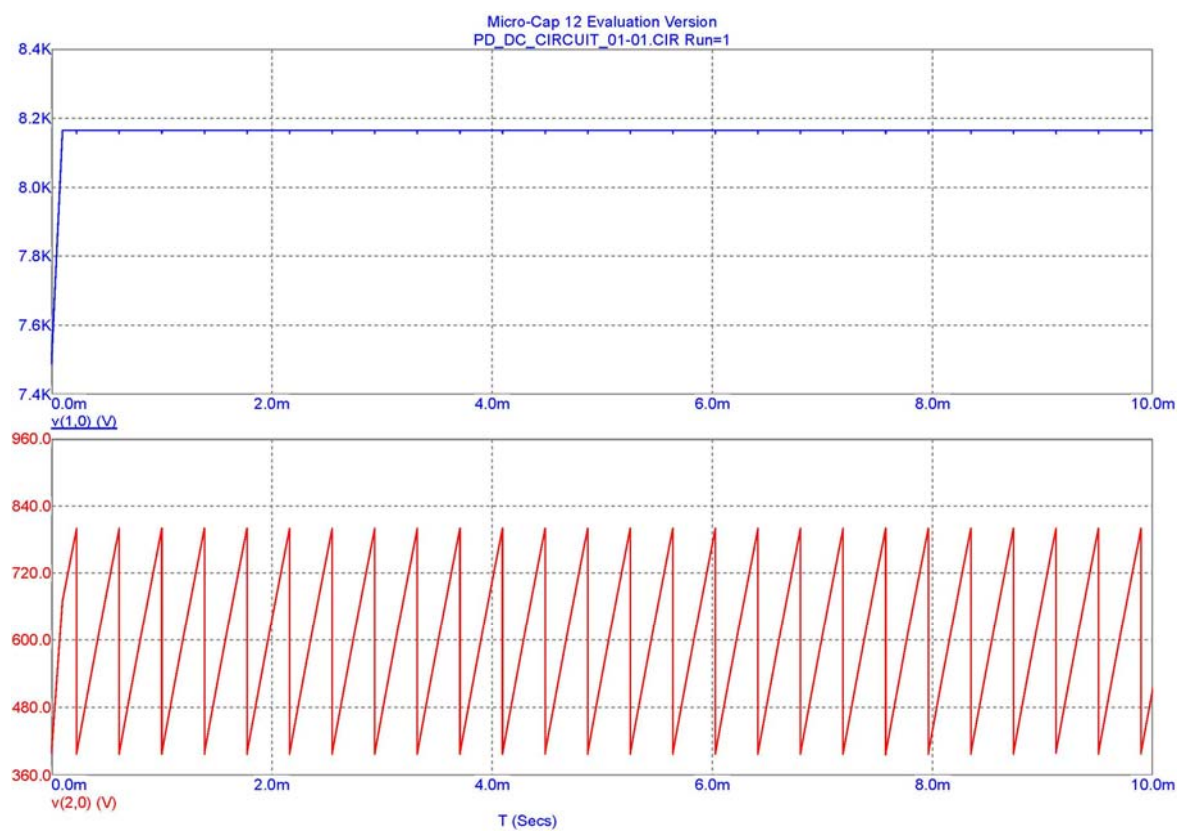


Рис. 28. Часткові розряди при $R_2 = 900$ МОм

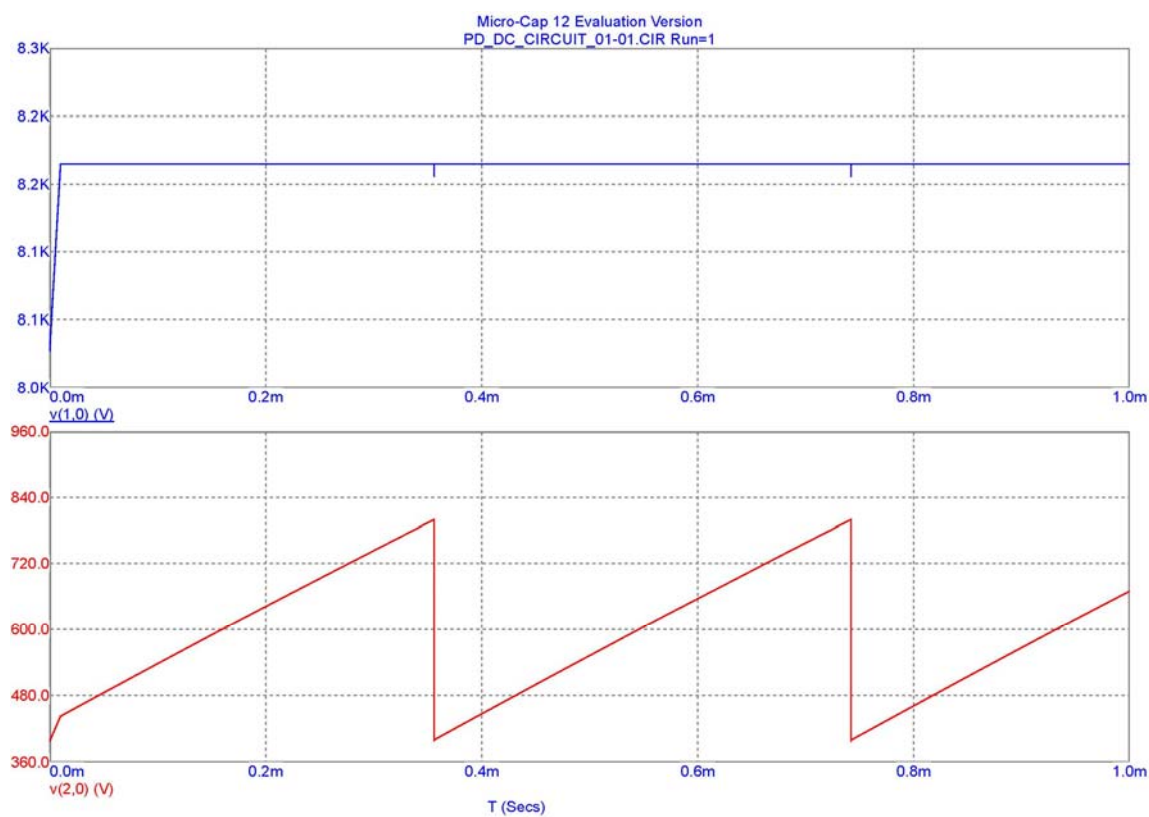


Рис. 29. Часткові розряди при $R_2 = 900 \text{ МОм}$ (збільшено фронт імпульсу)

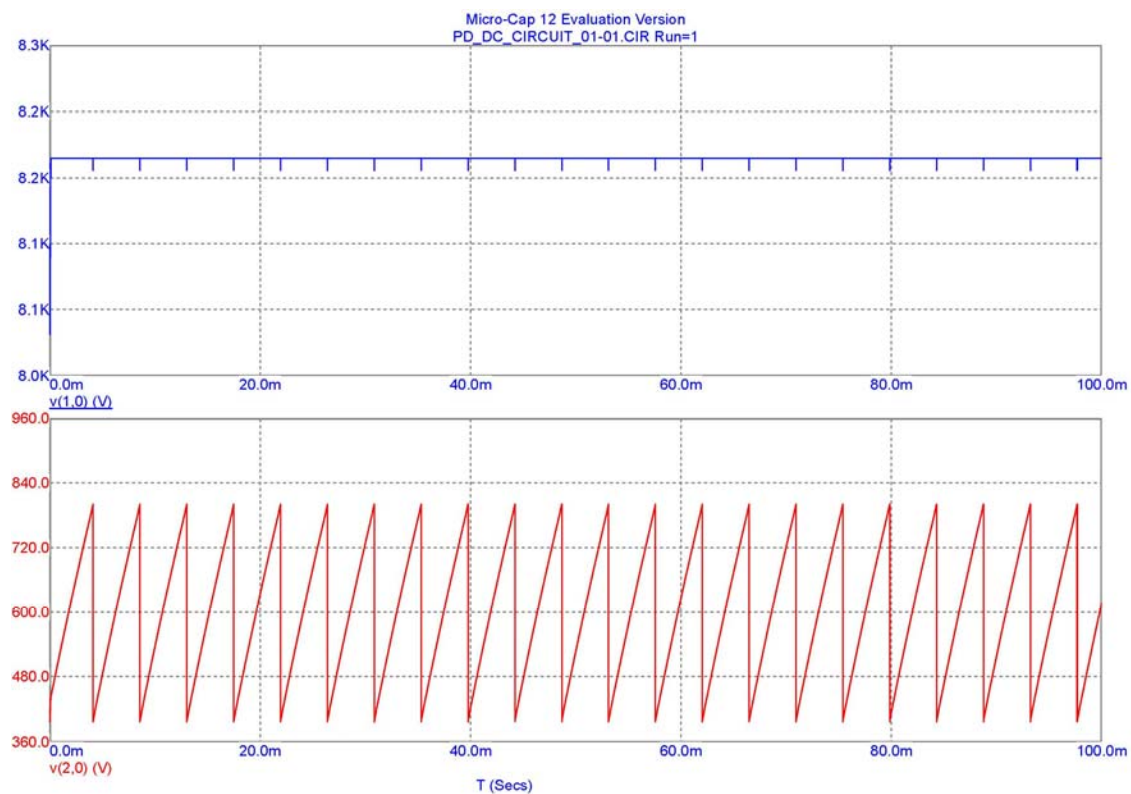


Рис. 30. Часткові розряди при $R_2 = 9000 \text{ МОм}$

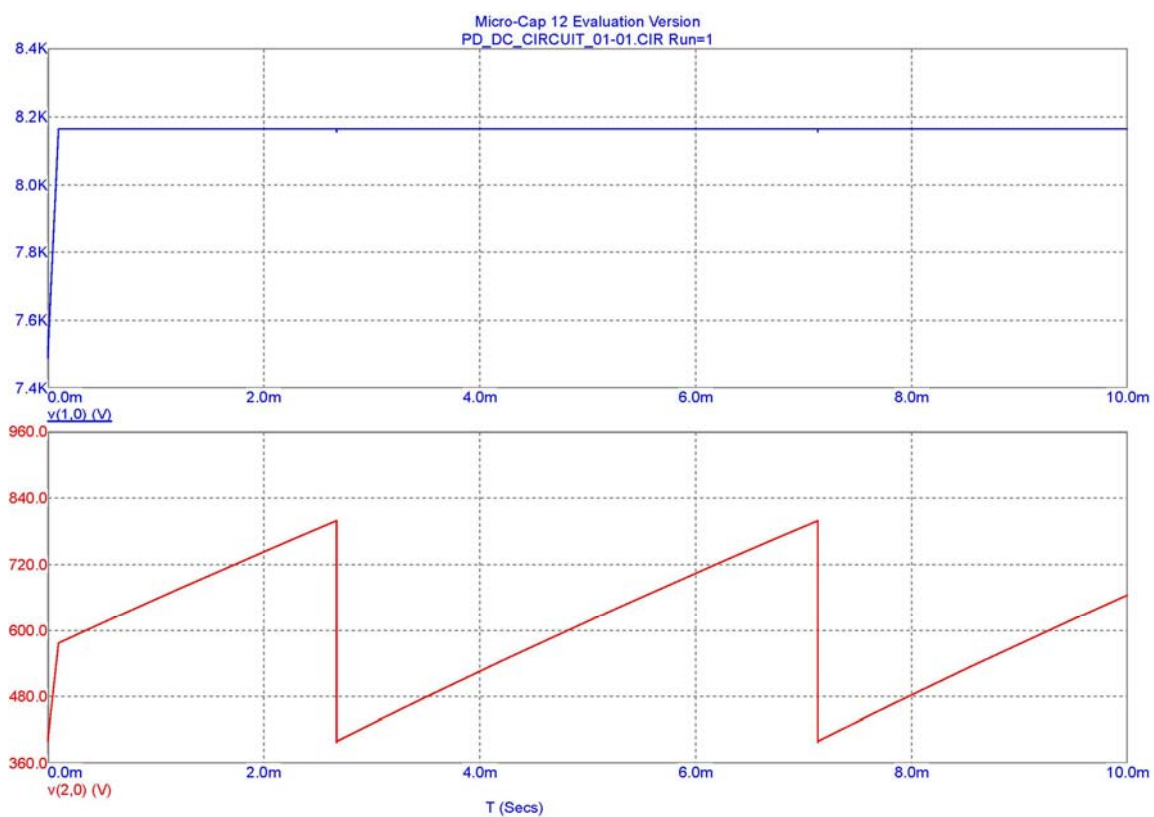


Рис. 31. Часткові розряди при $R_2 = 9000 \text{ МОм}$ (збільшено фронт імпульсу)

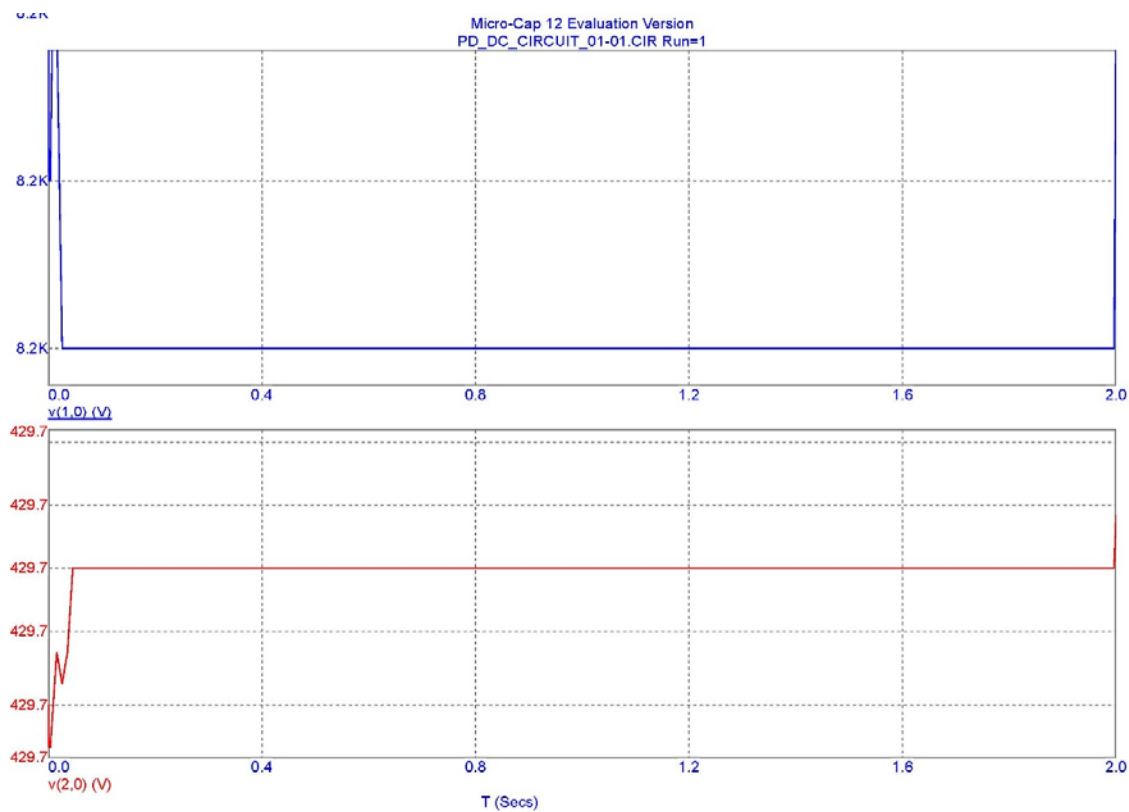


Рис. 32. Часткові розряди при $R_2 = 90000 \text{ МОм}$

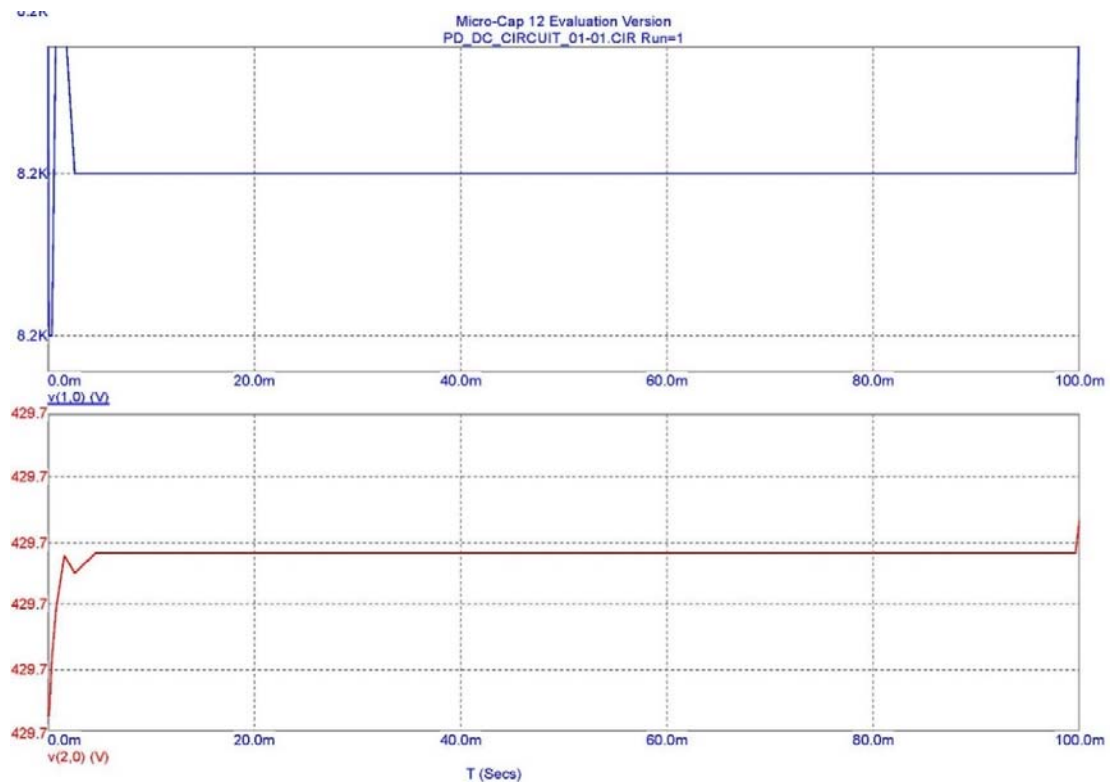


Рис. 33. Часткові розряди при $R_2 = 90000 \text{ МОм}$ (збільшено фронт імпульсу до 100 мс)

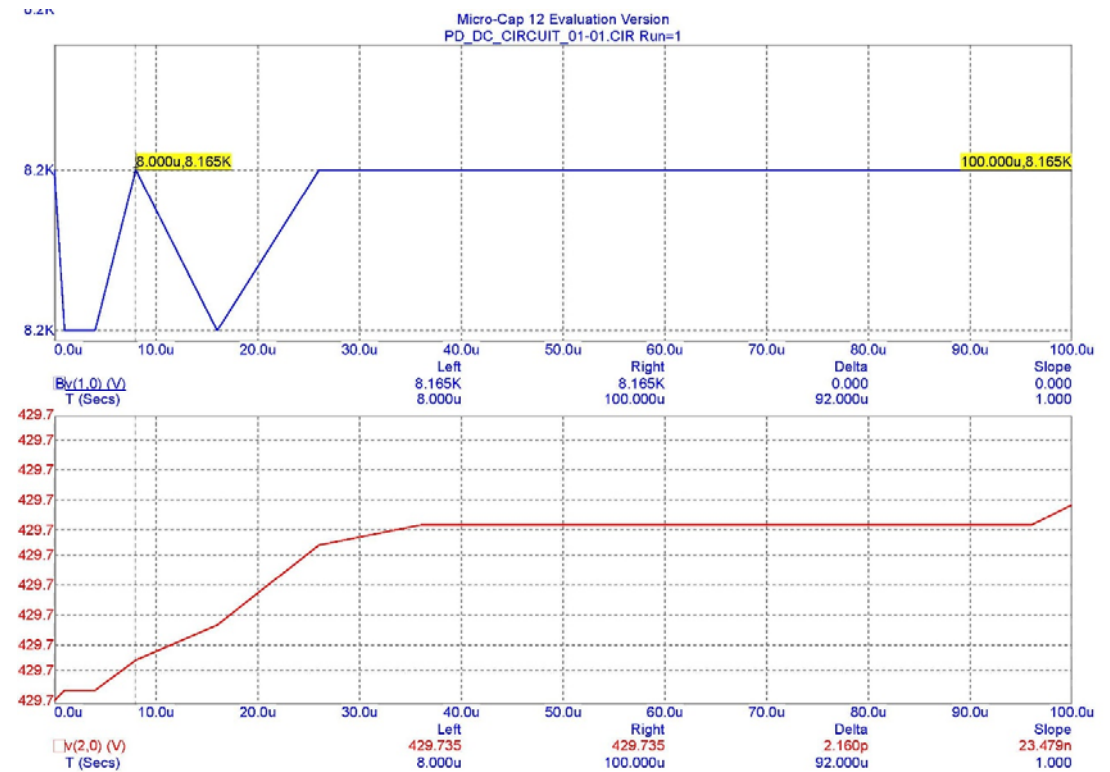


Рис. 34. Часткові розряди при $R_2 = 90000 \text{ МОм}$ (збільшений фронт імпульсу до 100 нс)

Детальний аналіз отриманих результатів дослідження у числовому вигляді представлений в таблиці 3.

Таблиця 3.
Результати дослідження характеристик часткових розрядів при різних значення опору витоку діелектрика

R ₂ , МОм	U ₀ , В	U _r , В	U _{np} , В	U ₁ ,	Імп.	t _{np} , с	n
340	8165	≈ 400	+800	+399.321	1	84.959·10 ⁻⁶	68
				-	2	229.682·10 ⁻⁶	
				-	3	374.557·10 ⁻⁶	
900				+399.321	1	228.255·10 ⁻⁶	26
				-	2	614.127·10 ⁻⁶	
				-	3	1·10 ⁻³	
9000				+399.320	1	2.713·10 ⁻³	2 (2,6)
				-	2	7.167·10 ⁻³	
				-	3	13.046·10 ⁻³	
90000				+429.735	1	-	0

Як ми можемо бачити з графіків дослідження (рис. 26) – (рис. 34) напруга початку розряду при $t = 0$ становить $U_1 \approx +400$ В. При цьому напруга пробою $U_{пр} = +800$ В, а напруга гасіння розряду $U_r \approx +400$ В. З результатів дослідження видно, що при зволоженій ізоляції кількість часткових розрядів на одиницю часу складає 68. І із збільшенням опору ізоляції їх інтенсивність суттєво зменшується (табл. 3).

Для простоти підрахунку та наглядності результатів моделювання, тривалість базисного проміжку часу обрано 10мс.

Тривалість фронту розряду при зволоженій та сухій ізоляції має суттєві відмінності. Час пробою першого ЧР складає: 84.96 мкс і наступні з $\Delta t \approx 144.8$ мкс для $R_2 = 340$ МОм; 228.255 мкс і $\Delta t \approx 385.87$ мкс для $R_2 = 900$ МОм; 2.713 мс і

$\Delta t \approx 4.465$ мс для $R_2 = 9000$ МОм. При $R_2 = 90000$ МОм на проміжку часу $t = (10 \dots 100)$ мкс спостерігаються коливальні процеси, напруга яких не перевищує значення пробивної напруги і рівна 429.735 В (рис. 34). Відповідно до цього можна зробити висновки, що дані процеси не являються частковими розрядами і в сухій ізоляції вони повністю відсутні.

3.2.2. Моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму з застосуванням однопівперіодного випрямляча

Відмінністю даної схеми від описаної у підрозділі 3.1.1 дисертаційної роботи (рис. 19) є наявність в ній елементів D_1 , R_4 , C_4 , що являють собою однопівперіодний випрямляч (рис. 35).

Функціональне джерело напруги задавалось сигналом $E_2 = 10 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(2\pi \cdot 50t)$ В, що являється неспотвореною синусоїдальною напругою.

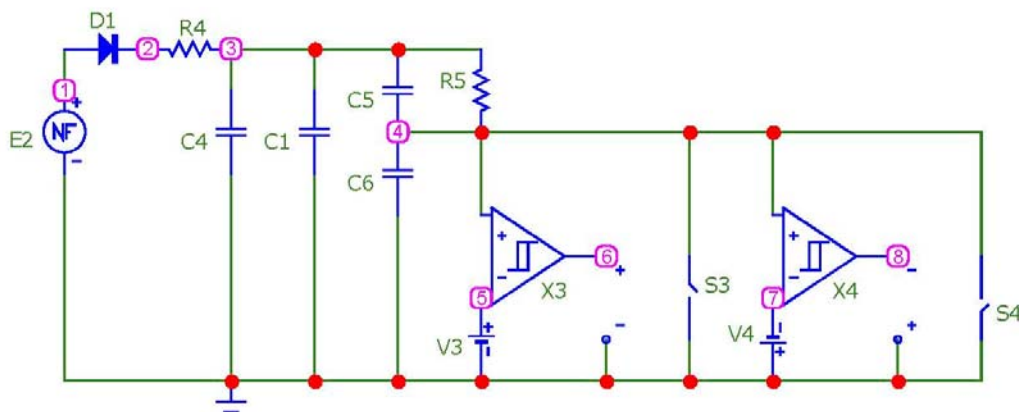


Рис. 35. Моделювання діелектрика з газовим включенням при частковому розряді з використанням компаратора напруги з гістересом і ключа, керованого напругою з гістерезисом, а також джерела опорної напруги та однонапівперіодним випрямлячем

На рисунку 35 E_2 – джерело напруги, що має як основну частоту, так і представляє суму гармонік напруги; R_4 – внутрішній опір джерела напруги; R_5 –

опір витоку діелектрика; C_1 – ємність діелектрика, без газового включення; C_5 – ємність ділянки діелектрика, включеного послідовно з газовим включення; C_6 – ємність газового включення; X_1 , X_2 – компаратори напруги з гістерезисом; S_1 , S_2 – ключі, керовані напругою з гістерезисом; V_1 , V_2 – джерела опорної напруги. Елементи моделі S_1 , S_2 , X_1 , X_2 являють собою розрядник, імітуючий пробій газового включення.

Обрані параметри схеми: $R_4 = 600$ кОм; $R_5 = 340 \cdot 10^6$, $900 \cdot 10^6$, $9 \cdot 10^9$, $90 \cdot 10^9$ Ом; $C_1 = 50$ пФ; $C_4 = 800$ пФ; $C_5 = 2$ пФ; $C_6 = 6$ пФ; $V_1 = V_2 = 600$ В; опір ключів S_1 та S_2 у розімкненому стані становить 10 ГОм, а замкненому 100 Ом.

Резистор R_5 відіграє аналогічну роль, що й резистор R_2 в схемі рис. 25 та має такі ж значення.

Результати моделювання

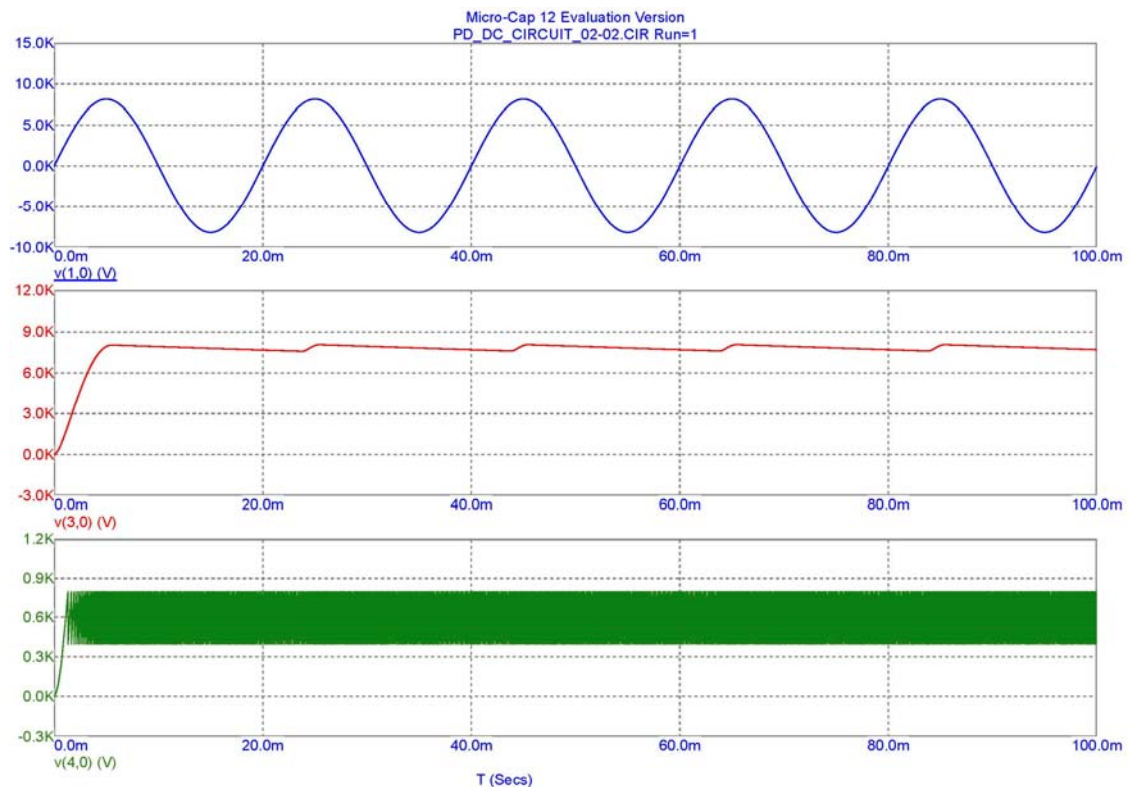


Рис. 36. Часткові розряди при $R_5 = 340$ МОм

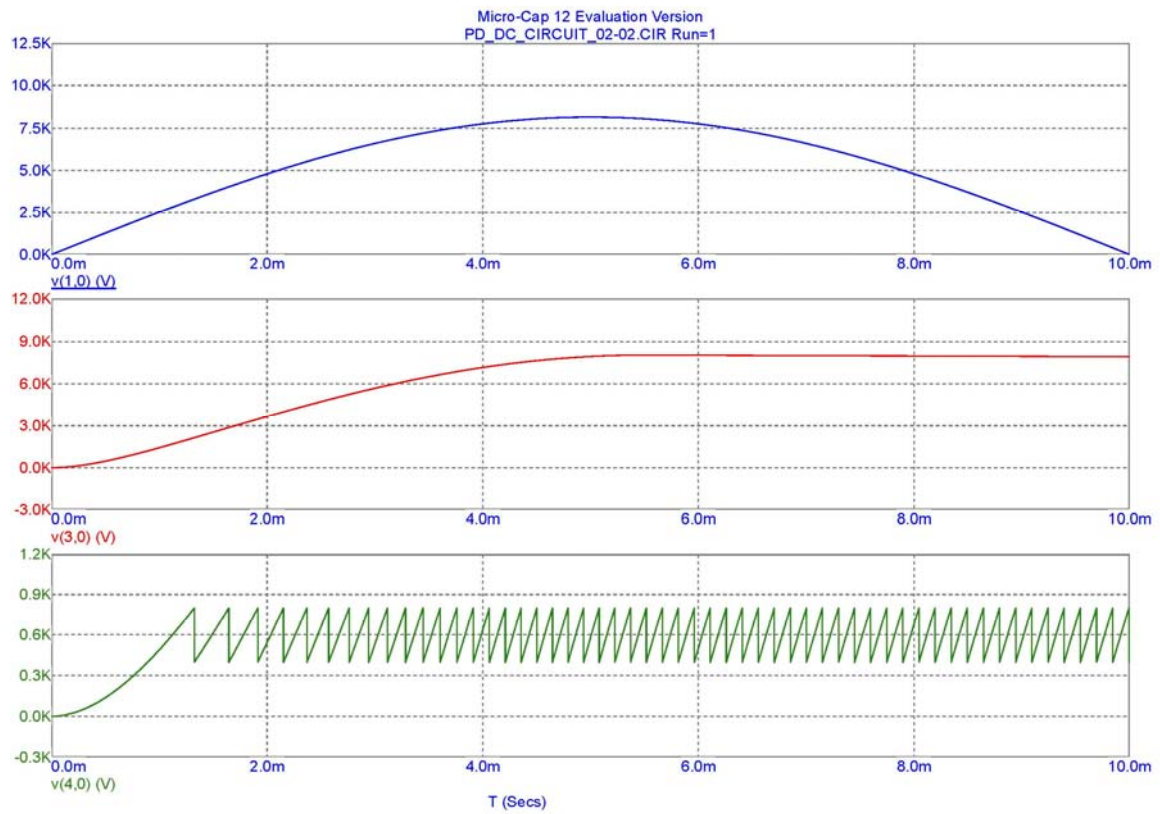


Рис. 37 Часткові розряди при $R_5 = 340$ МОм (збільшено фронт імпульсу)

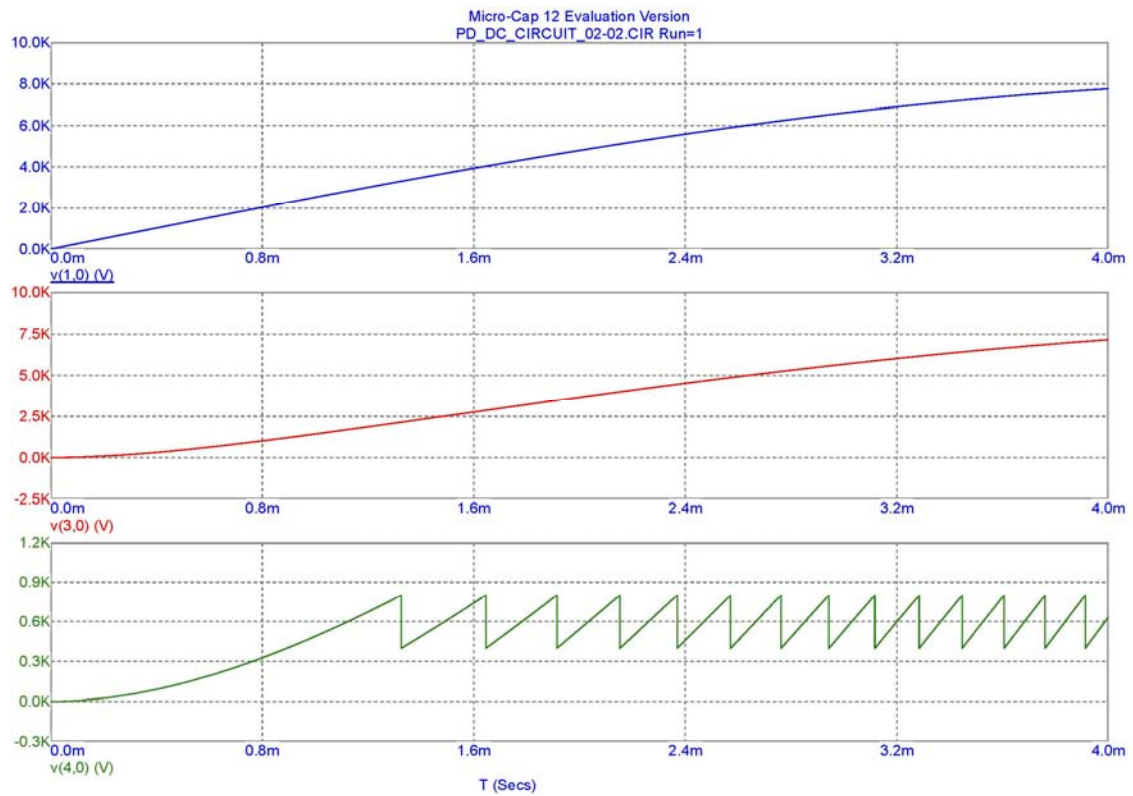


Рис. 38. Часткові розряди при $R_5 = 340$ МОм (збільшено фронт імпульсу)

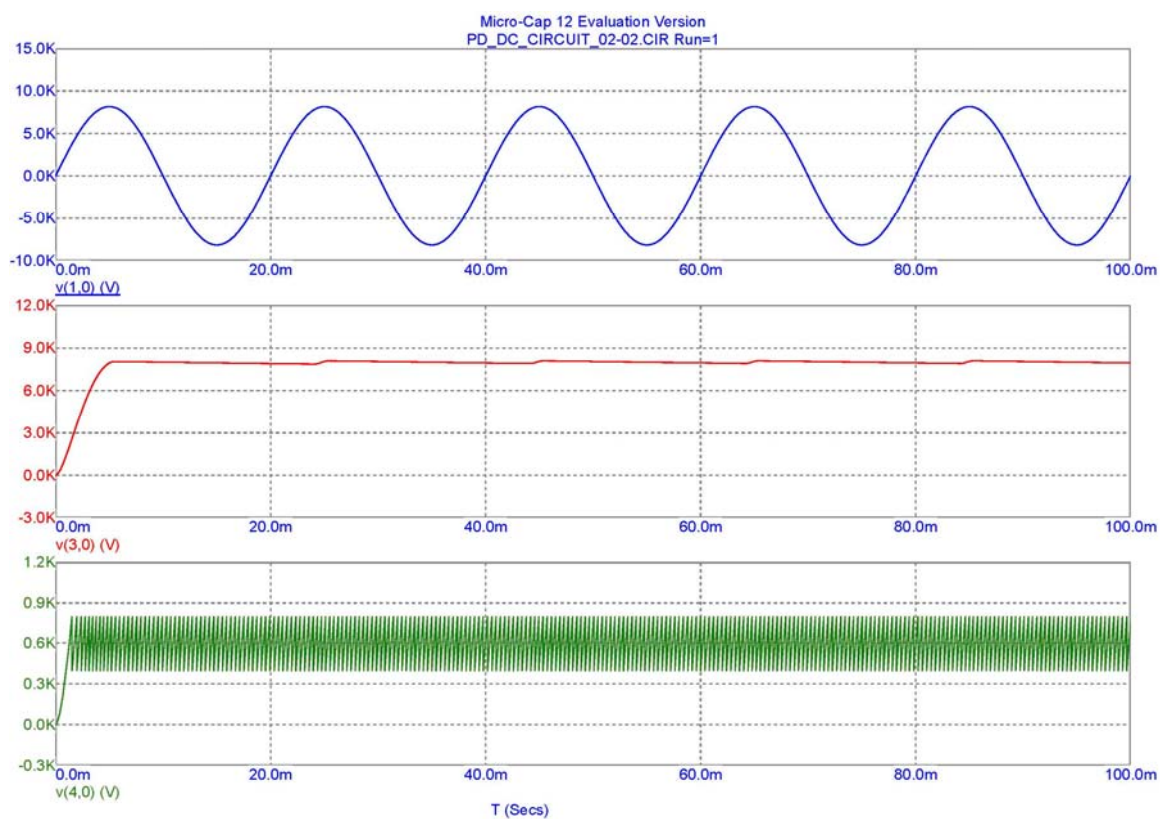


Рис.39. Часткові розряди при $R_5 = 900 \text{ МОм}$

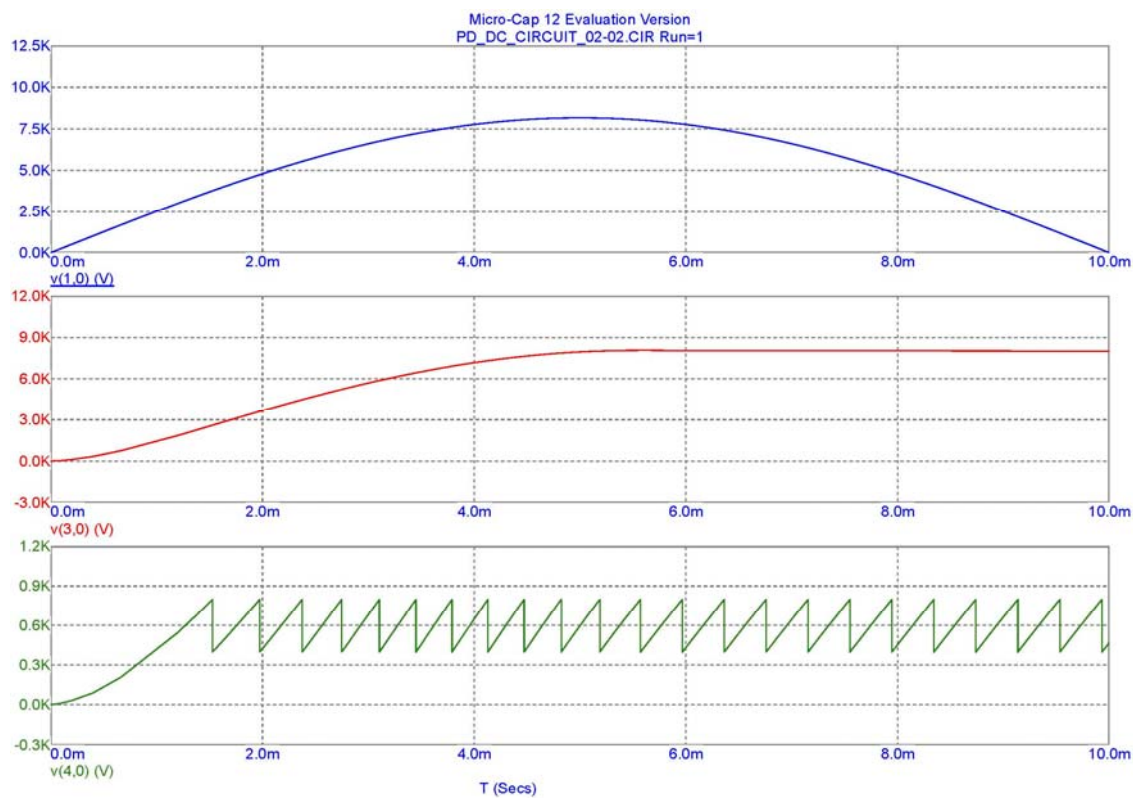


Рис. 40. Часткові розряди при $R_5 = 900 \text{ МОм}$ (збільшено фронт імпульсу)

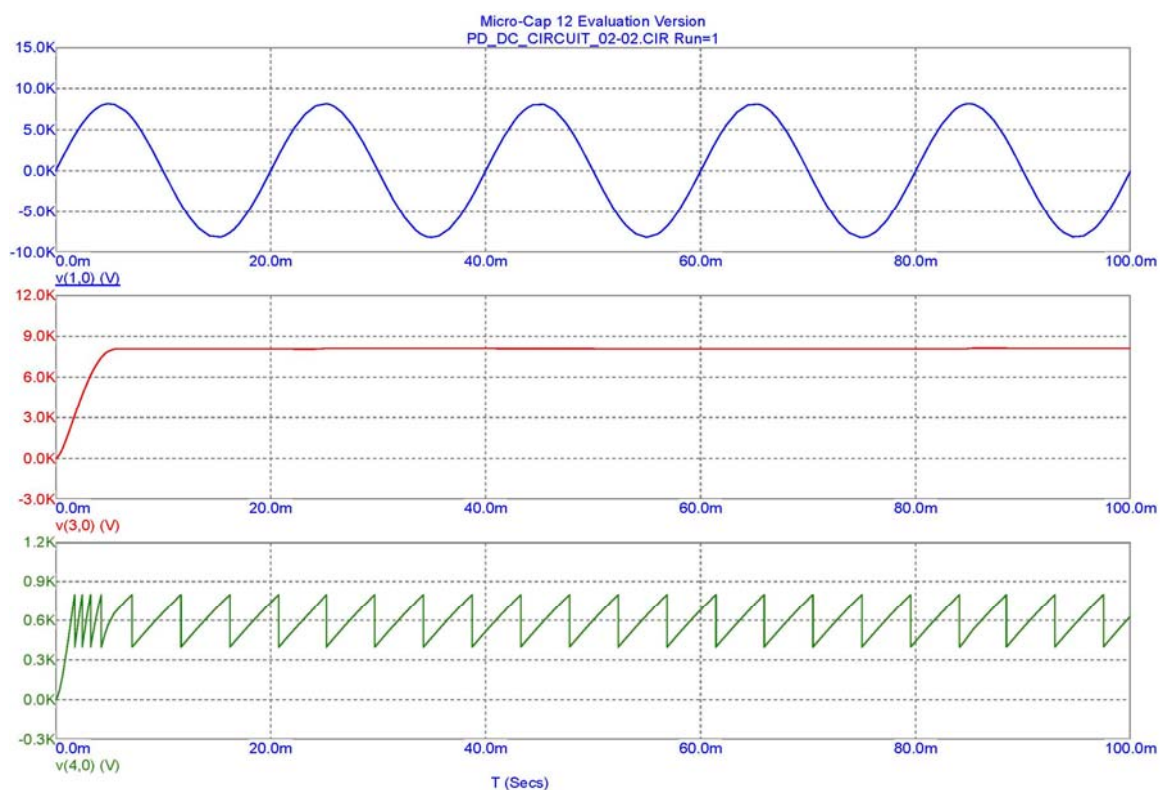


Рис.41. Часткові розряди при $R_5 = 9000 \text{ МОм}$

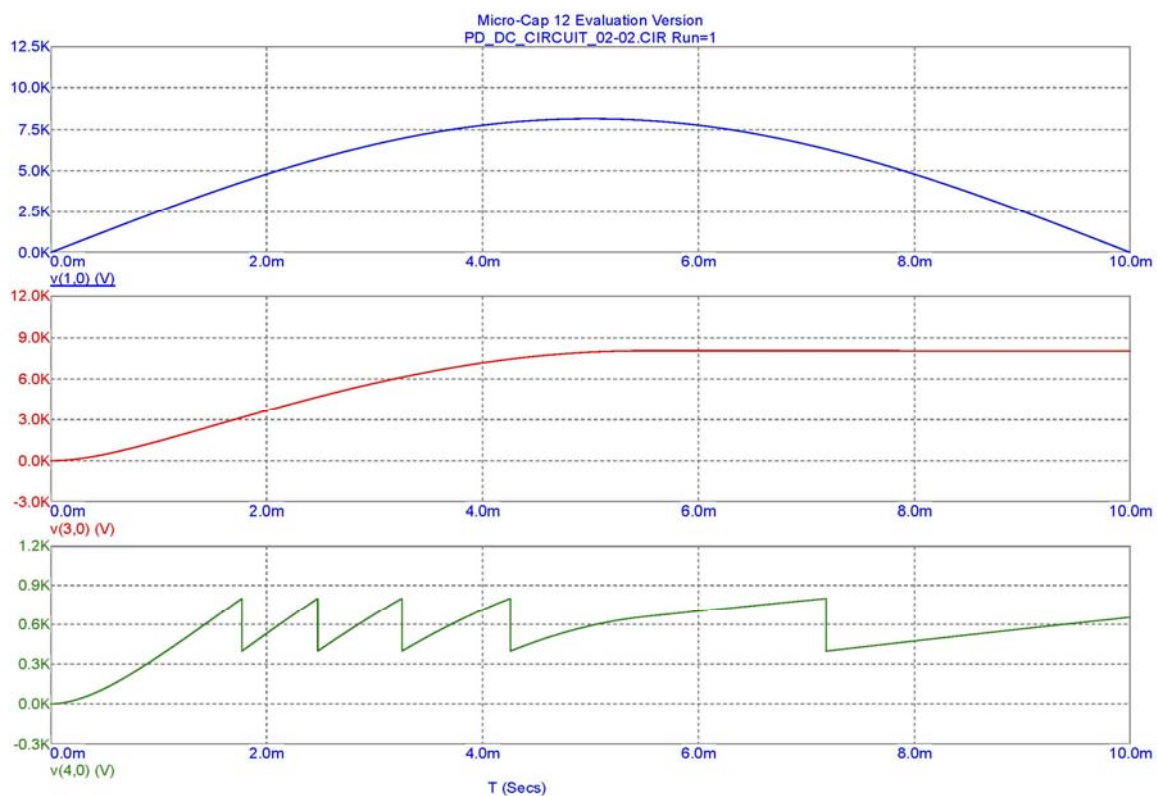


Рис.42. Часткові розряди при $R_5 = 9000 \text{ МОм}$ (збільшено фронт імпульсу)

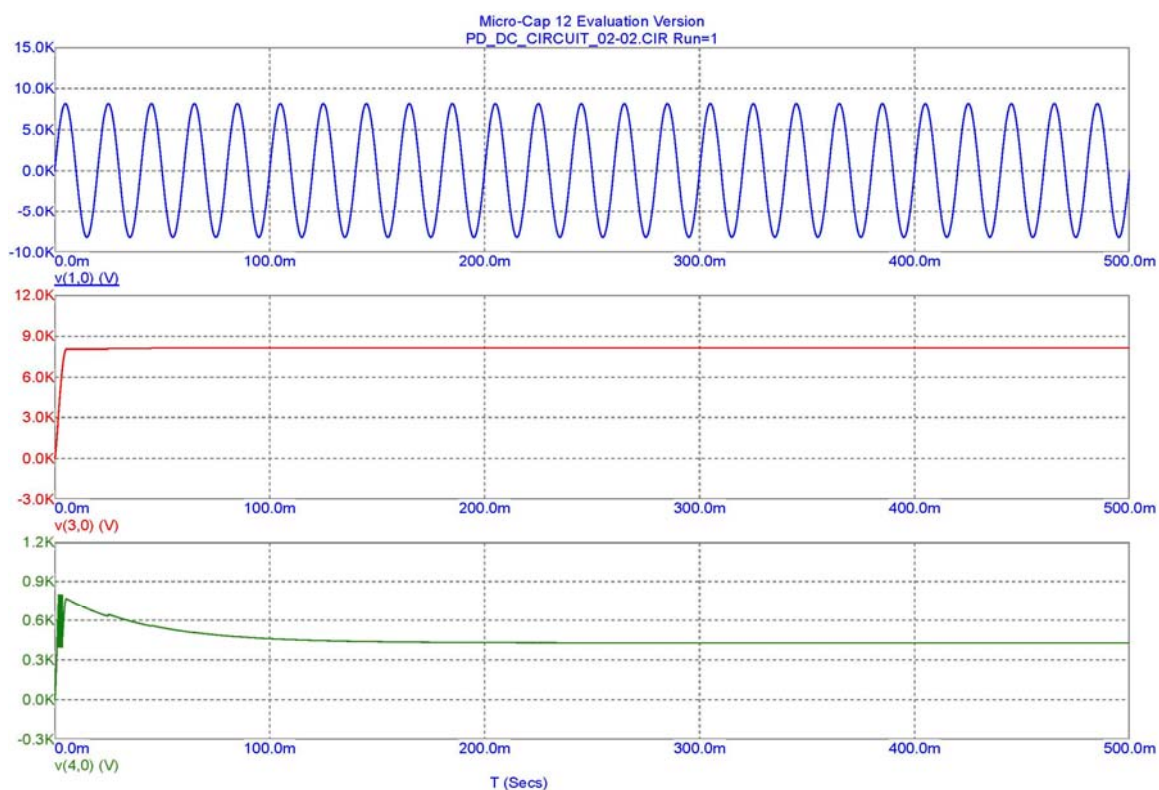


Рис. 43. Часткові розряди при $R_5 = 90000 \text{ МОм}$

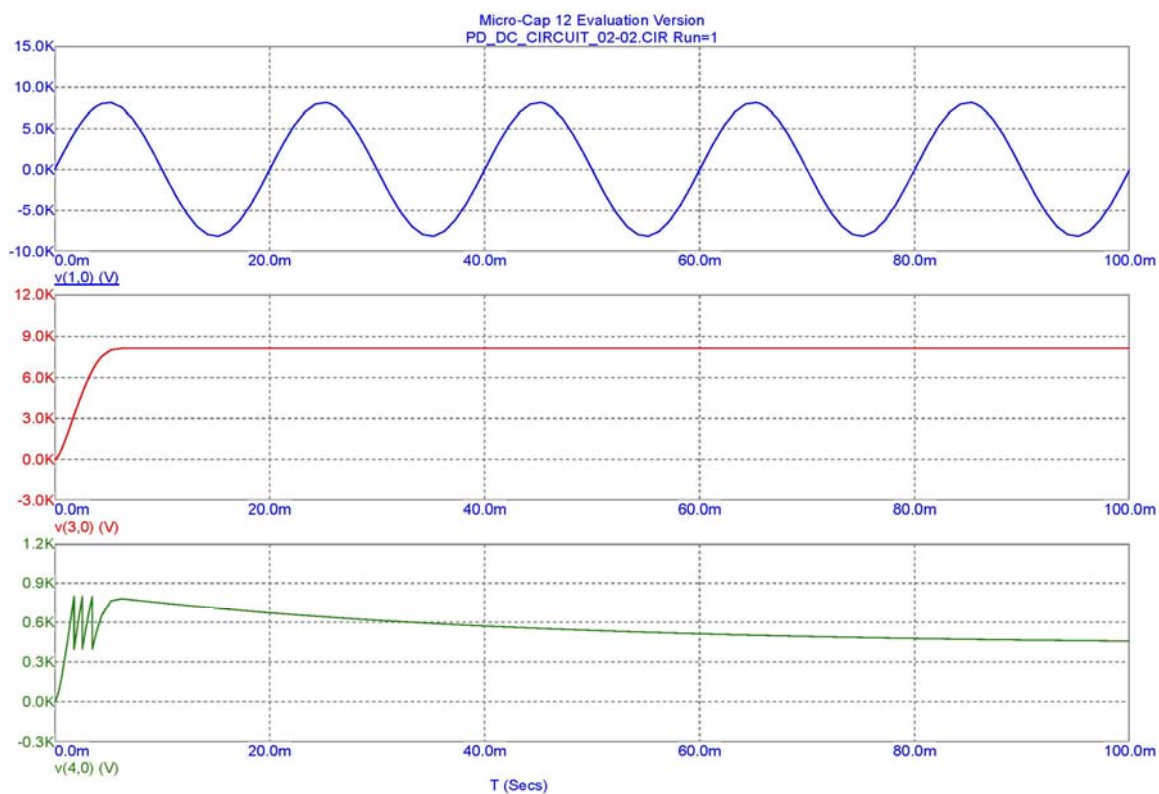


Рис. 44. Часткові розряди при $R_5 = 90000 \text{ МОм}$ (збільшено фронт імпульсу)

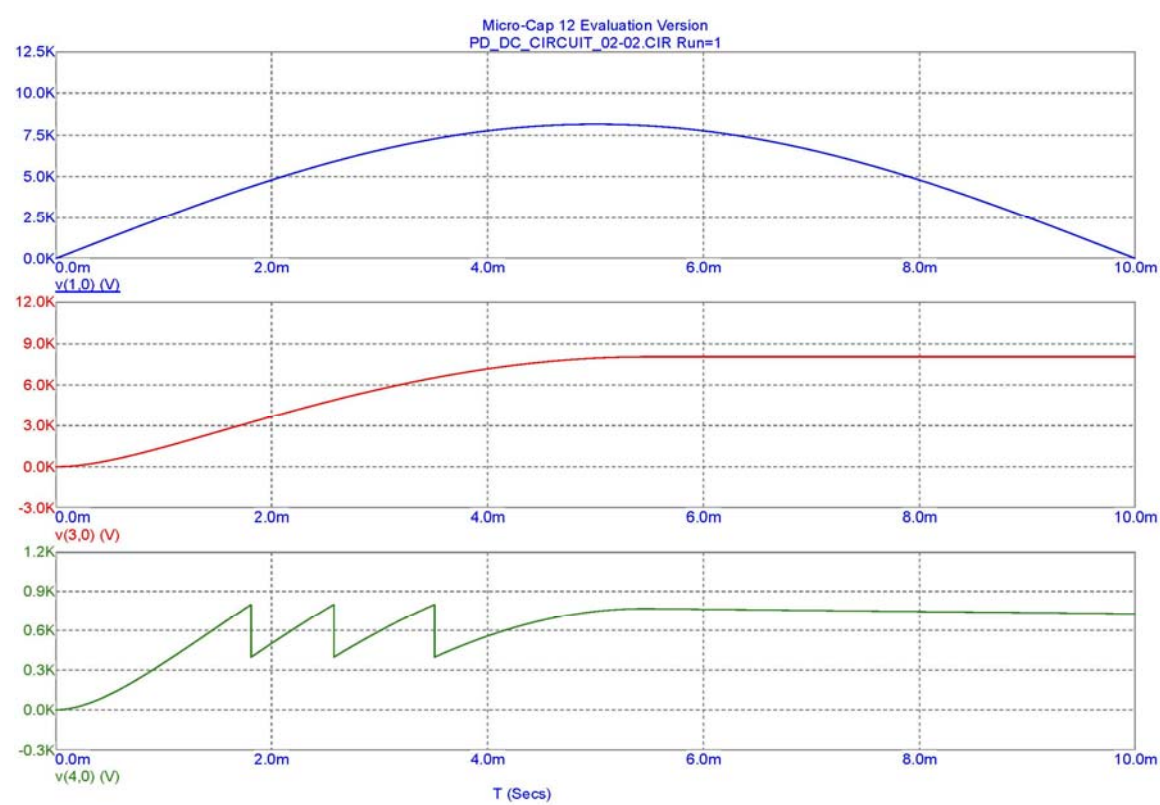


Рис.45. Часткові розряди при $R_5 = 9000 \text{ МОм}$ (збільшено фронт імпульсу)

Таблиця 4.

Результати дослідження характеристик часткових розрядів при різних значення опору витoku діелектрика

R ₅ , МОм	U ₀ , В	U _г , В	U _{np} , В	U ₁ ,	Імп.	t _{np} , мс	n
340	8165	≈ 400	+800	-3.511·10 ⁻⁴¹	1	1.078	55
				-	2	1.460	
				-	3	1.759	
900				-3.404·10 ⁻⁴¹	1	1.529	26
				-	2	1.976	
				-	3	2.376	
9000				-2.359·10 ⁻⁴¹	1	1.774	5
				-	2	2.476	

R_5 , МОм	U_0 , В	U_r , В	$U_{пр}$, В	U_1 ,	Імп.	$t_{пр}$, мс	n
				-	3	3.254	
90000				$-5.092 \cdot 10^{-42}$	1	1.814	3
				-	2	2.578	
				-	3	3.511	

Як ми можемо бачити з графіків дослідження (рис. 35) – (рис. 45) напруга початку розряду при $t = 0$ становить $U_1 \approx 0$ В. При цьому напруга пробою $U_{пр} = +800$ В, а напруга гасіння розряду $U_r \approx +400$ В. З результатів дослідження видно, що при зволоженій ізоляції кількість часткових розрядів на одиницю часу складає 55, що менше ніж при постійному струмі. І із збільшенням опору ізоляції їх інтенсивність зменшується (табл. 3).

Час пробою першого часткового розряду складає: 1.078 мс і наступні з $\Delta t \approx 0.312$ мкс для $R_5 = 340$ МОм; 1.529 мкс і $\Delta t \approx 0.42$ мкс для $R_5 = 900$ МОм; 1.774 мс і $\Delta t \approx 0.77$ мс для $R_5 = 9000$ МОм; 1.814 мс і $\Delta t \approx 0.817$ мс для $R_5 = 90000$ МОм. Далі напруга знову збільшується до значення 780.507 В при $t = 6.249$ мс, не перевищуючи напругу пробою і зменшується до значення 428.235 В та залишається незмінною на усьому проміжку часу.

На другому фреймі (рис. 35) – (рис. 45) зображена напруга, що діє на ізоляцію без повітряного включення (яку імітує конденсатор C_1). При опорі витоку $R_5 = 340$ МОм напруга $U_{C1max} \approx 8.074$ кВ з $\Delta U_{C1} = 0.459$ кВ між верхньою та нижньою границею колювання; $R_5 = 900$ МОм напруга $U_{C1max} \approx 8.102$ кВ з $\Delta U_{C1} = 0.41$ кВ; $R_5 = 9000$ МОм напруга $U_{C1max} \approx 8.074$ кВ з $\Delta U_{C1} = 0.459$ кВ; $R_5 = 90000$ МОм напруга $U_{C1max} = 8.138$ кВ з $\Delta U_{C1} = 0.003$ кВ, що найбільш наближено до ідеального постійного струму. Більш точні данні вказані в табл. 5.

Таблиця. 5.

Результати дослідження прикладеної напруги до ізоляції без наявності у ній повітряного включення

R₅, МОм	№ імп.	U_{C1max}, кВ	U_{C1min}, кВ	t_{C1max}, мс	t_{C1min}, мс
340	1	8.049	7.595	5.505	23.739
	2	8.074	7.615	25.386	43.809
	3	8.075	7.616	45.4	63.831
900	1	8.057	7.879	5.559	23.971
	2	8.101	7.919	25.498	44.194
	3	8.103	7.921	45.336	64.126
9000	1	8.081	8.064	7.113	24.182
	2	8.107	8.076	25.183	64.364
	3	8.094	8.076	65.378	83.467
90000	1	8.138	8.136	6.249	16.249
	2			25.249	44.248
	3			45.248	64.248

Для розрахунку кількості розрядів скористаємося (14) математичного методу описаного у підрозділі 2.2.

Попередньо розрахуємо швидкість зміни напруги повітряного включення на проміжку Δt :

$$T = \frac{R_6 R_B}{R_6 + R_B} (C_6 + C_B) = \begin{cases} 2.6306 \cdot 10^{-3}, \text{ при } R = 340 \text{ МОм} \\ 6.6055 \cdot 10^{-3}, \text{ при } R = 900 \text{ МОм} \\ 0.0379, \text{ при } R = 9000 \text{ МОм} \\ 0.072, \text{ при } R = 90000 \text{ МОм} \end{cases}$$

Відповідно проміжок часу між частковими розрядами дорівнює:

$$\Delta t = T \ln \frac{u_B - u_r}{u_B - u_{\text{пр}}} = \begin{cases} 1.3912 \cdot 10^{-4}, \text{ при } R = 340 \text{ МОм} \\ 3.4935 \cdot 10^{-4}, \text{ при } R = 900 \text{ МОм} \\ 2.0042 \cdot 10^{-3}, \text{ при } R = 9000 \text{ МОм} \\ 3.8079 \cdot 10^{-3}, \text{ при } R = 90000 \text{ МОм} \end{cases}$$

Розрахуємо кількість часткових розрядів за 1 с:

$$n_- = \frac{1}{\Delta t} = \begin{cases} 7188, \text{ при } R = 340 \text{ МОм} \\ 2862, \text{ при } R = 900 \text{ МОм} \\ 498.961, \text{ при } R = 9000 \text{ МОм} \\ 262.611, \text{ при } R = 90000 \text{ МОм} \end{cases}$$

Приведемо отримані значення до базисного проміжку часу 10 с:

$$n_- = \frac{n_-}{100} = \begin{cases} 71.88 \approx 72, \text{ при } R = 340 \text{ МОм} \\ 28.62 \approx 29, \text{ при } R = 900 \text{ МОм} \\ 4.99 \approx 5, \text{ при } R = 9000 \text{ МОм} \\ 2.63 \approx 3, \text{ при } R = 90000 \text{ МОм} \end{cases}$$

Порівнюючи результати схемотехнічного моделювання та результати, отримані математичним шляхом бачимо, що результати теоретичних розрахунків та схематичного моделювання збігаються тільки при високих значеннях опору. При зниженні опору похибка суттєво зростає. Це можна вважати ще одним із знайдених незначних недоліків трьох-ємнісної схеми заміщення діелектрика з газовою порожниною при частковому розряді.

3.3. Експериментальне дослідження часткових розрядів на постійному струмі в лабораторіях кафедри теоретичної електротехніки

3.3.1. Стенд дослідження характеристик часткових розрядів ізоляції високовольного устаткування

Добре відомо, що часткові розряди мають деструктивний характер утворення. Існує багато інформації про те, як виявляти та оцінювати характерні

параметри розряду при напрузі змінного струму, але мало опублікованих робіт з вимірювання часткових розрядів при напрузі постійного струму.

Частковий розряд, як правило, виявляється шляхом об'єднання струму зміщення в провідниках об'єкта випробування. Вимірне значення – це величина розряду, виражена зазвичай в пКл. Як зазначалось раніше, частковий розряд можна визначити об'єднавши струм зміщення провідників та самого об'єкта випробування [33]. А основними величинами розряду, що можна пов'язати з його утворенням вважаються q_j , t_1 та $u(t_1)$.

Згідно таких думок, на кафедрі Теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інституту ім. Ігоря Сікорського» було розроблено спеціальний стенд для дослідження часткових розрядів при різних формах прикладеної напруги [13].

Об'єктом фізичного моделювання часткових розрядів є міжелектродний проміжок, що складається з двох співвісних циліндричних електродів радіусами 25 мм та 70 мм з електротехнічним картоном товщиною 2,0 мм між ними. Зовнішня поверхня електротехнічного картону вкрита численними повітряними порожнинами. Висока напруга була прикладена до верхнього циліндричного електрода меншого діаметра. Часткові розряди виникають в області з найбільшою напруженістю поля, а саме у повітряних порожнинах картону біля поверхні коронуючого електрода.

Метою даного дослідження є порівняння утворення часткових розрядів при постійній напрузі зволоженої та сухої ізоляції приблизно однакових значеннях напруги, а також утворення часткових розрядів при змінній та постійній напрузі однакового номіналу.

Високовольтна частина даної установки, що представлена на рис. 46, являє собою підвищувальний трансформатор, з'єднувальний конденсатор, об'єкт вимірювання, фільтр верхніх частот та його екран [12], кіловольтметр та кабель, для приєднання до підсилювача та осцилографа. Низьковольтна частина (рис. 47)

– цифровий осцилограф та осцилограф як програмне забезпечення на ноутбучі, приєднаний за допомогою USB-інтерфейса.



Рис. 46. Високовольтна частина станда для дослідження часткових розрядів:

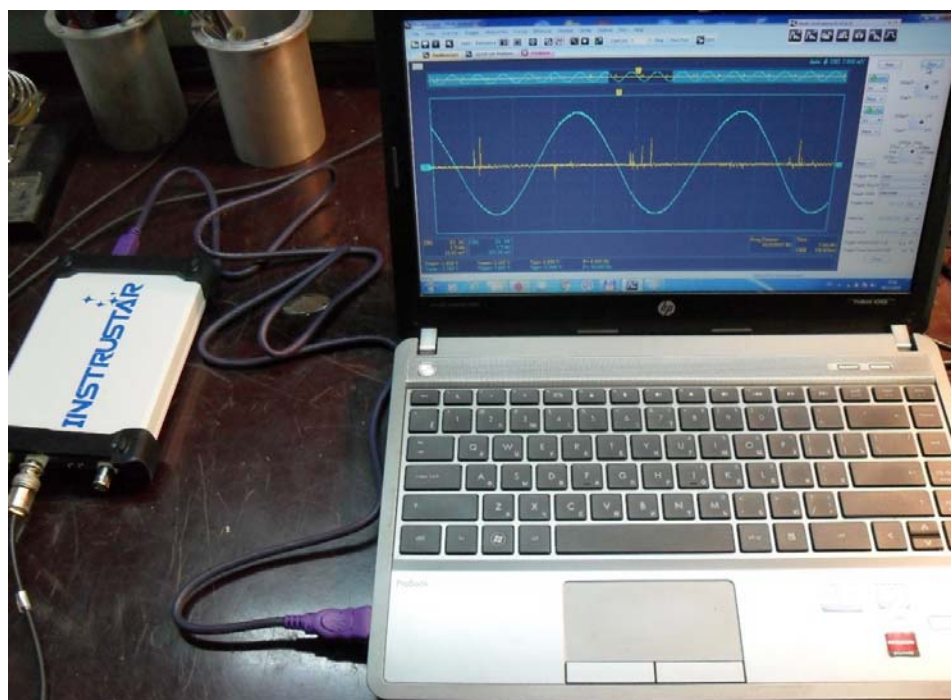


Рис. 47. Низьковольтна частина станду дослідження

Для реєстрації імпульсів часткових розрядів використовувався цифровий осцилограф PC-OSCILLOSCOPE, модель ISDS220B. Зв'язок осцилографа з персональним комп'ютером здійснювалася через USB-Інтерфейс.

3.3.2. Утворення часткових розрядів при постійній напрузі зволоженого зразку

Проміжок, що досліджувався на осцилографі для усіх представлених прикладів однаковий. Опір сухого зразку становив рівним 90000 МОм, а зволоженого – 340 МОм. Кривою яскраво-синього кольору показано форму прикладеної напруги до міжелектродного проміжку, а яскраво-жовтою – зареєстровані імпульси часткових розрядів. Зазначимо, що параметри напруги прикладеної до проміжку конвертувалися програмою для зручного зображення осцилограм, тобто можна вважати, що крива напруги в дійсності має розмірність у кВ/под. При чому, зареєстровані імпульси часткових розрядів на осцилограмі зображені у реальних істинних одиницях В/под.

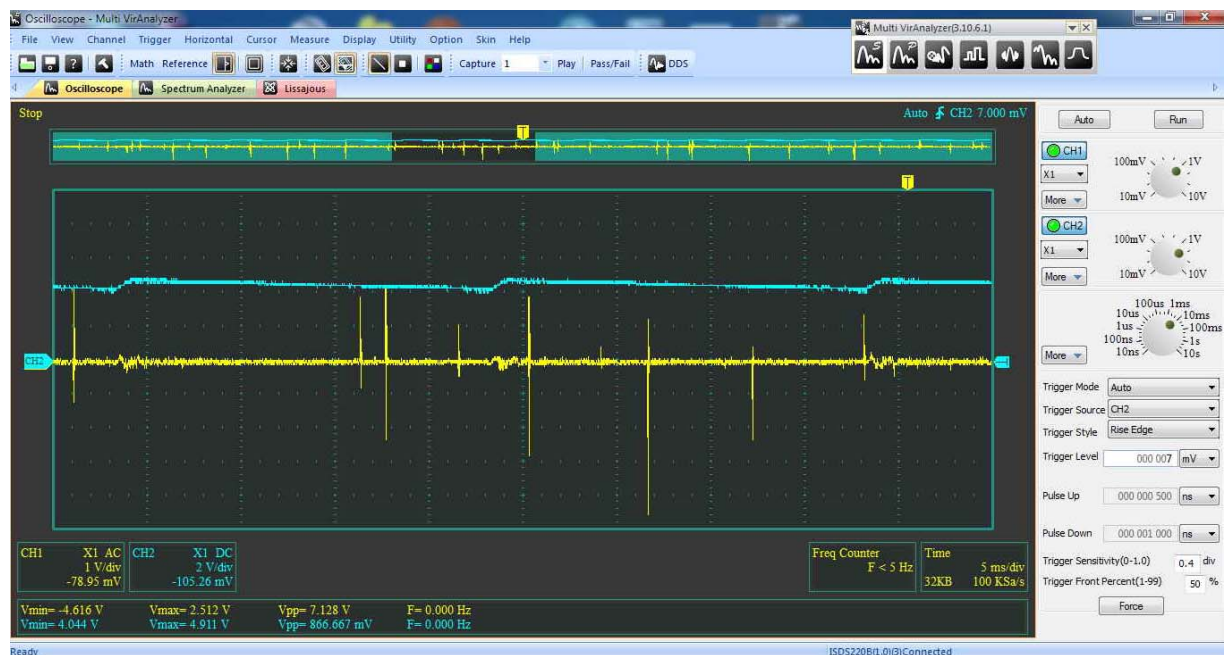


Рис. 48. Частковий розряд зволоженого зразку при постійній напрузі 4,9 кВ

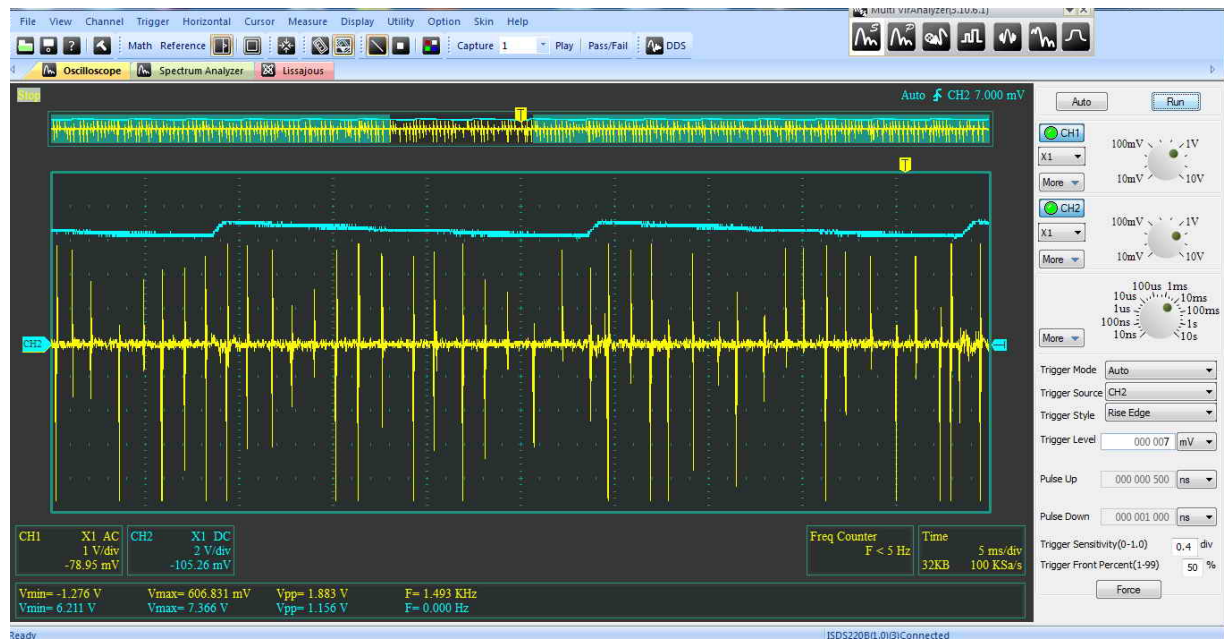


Рис. 49. Частковий розряд зволоженого зразку при постійній напрузі 7,4 кВ

3.3.3. Утворення часткових розрядів при постійній напрузі сухого зразку

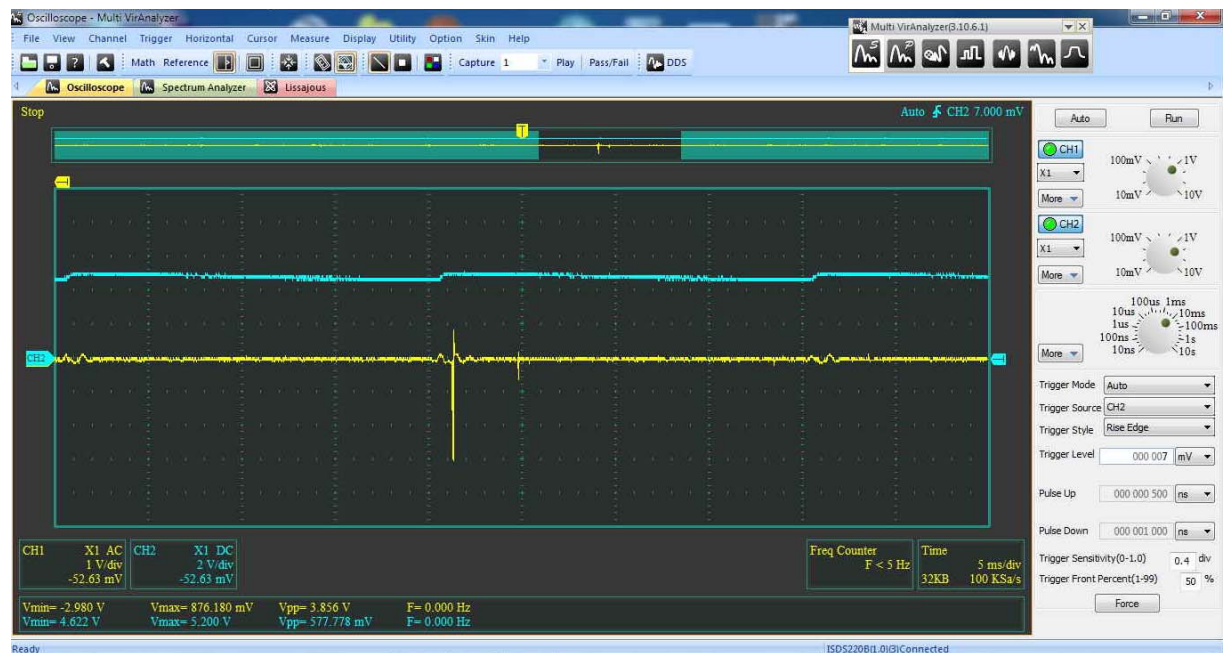


Рис. 50. Частковий розряд сухого зразку при постійній напрузі 5,2 кВ

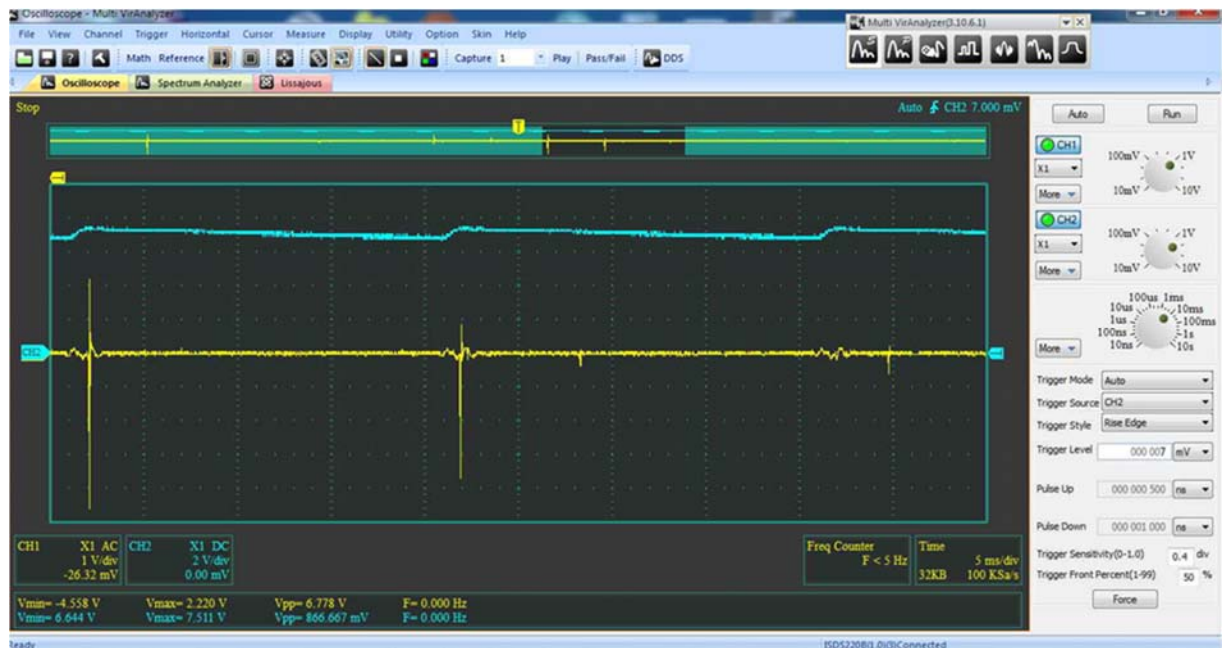


Рис. 51. Частковий розряд сухого зразку при постійній напрузі 7,5 кВ

При напрузі, прикладеній до ізоляційного проміжку, що становила 5.2 кВ, згідно отриманої осцилограми дослідження бачимо, що у випадку сухого зразку ізоляції за досить тривалий час дослідження утворюється лише 1 імпульс часткового розряду амплітудою 0.876 В. У випадку зволоженої при прикладеній до міжелектродного проміжку напруги номіналу 4.9 кВ, в ізоляції інтенсивність утворення часткових розрядів дещо збільшується та становить рівною 4, з амплітудним значенням 2.512 В.

На рис. 49 та 51 зображено осцилограми при досліджуваній напрузі 7.5 кВ зволоженого та сухого зразків ізоляції відповідно.

Як ми можемо бачити, при напрузі проміжку 7.5 кВ сухого зразку, кількість часткових розрядів, що утворилася становить 2 з максимальним значенням імпульсів 2.22 В. Навпроти, у зволоженій ізоляції, при прикладеній напрузі однакового номіналу, інтенсивність часткових розрядів склала 8, з амплітудним значенням імпульсу ЧР 1.276 В.

Базуючись та дослідженнях, проведених в [22], можна представити наш імпульс часткового розряду у вигляді деякої кривої коливання. Таким чином,

згідно [22] безпосередньо до часткового розряду відноситься тільки перший максимум кривої коливання, що і являється його імпульсом, а другий та усі наступні імпульси меншої амплітуди – це лише затухаючі коливання у проміжку. Відповідно таку закономірність утворення можемо спостерігати у випадку зволоженого зразку ізоляції, де наявна висока інтенсивність утворення часткових розрядів (рис. 48), (рис. 49), тобто ефект проявляється наявніше.

Для того, щоб можна було співставити результати вимірювань при напрузі постійного та змінного струму, значення прикладеної змінної напруги обиралося рівним 7.5 кВ амплітудного значення, тобто 5.3 кВ діючого.

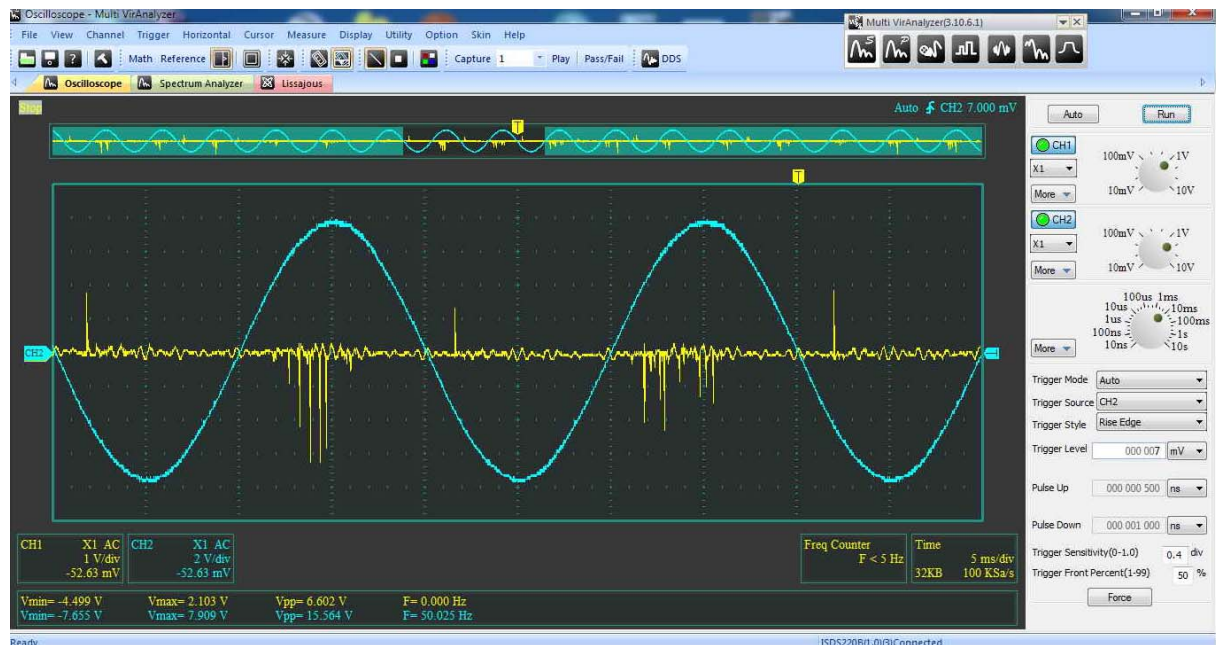


Рис. 52. Частковий розряд зволоженого зразку при змінній напрузі 7,6 кВ

На рис. 52 та 53 зображено отримані осцилограми зареєстрованих часткових розрядів при змінній напрузі 7,6 кВ для зволоженого та сухого зразку відповідно. Як ми можемо бачити, інтенсивність часткових розрядів при напрузі змінного струму у кожний півперіод прикладеної напруги, а також їх амплітуди мають незначні відмінності. Порівнюючи отримані осцилограми рис. 52 та 53 можемо

помітити, що часткові розряди, не дивлячись на несуттєву різницю параметрів, зберігають деяку закономірність утворення, що демонтує ефект полярності.



Рис. 53. Частковий розряд сухого зразку при змінній напрузі 7,8 кВ

При змінній напрузі прикладеній до зволоженого зразку ізоляції рівній 7,6 кВ, в негативний півперіод напруги наявні часткові розряди з амплітудним значенням 2,103 В, у кількості 1. При чому, у позитивній півхвилі синусоїди, кількість ЧР дещо більша – рівна 2, які мають максимальне значення напруги - 4,499 В. З отриманої осцилограми рис. 53 для сухого зразку ізоляції, при напрузі прикладеної до проміжку 7,8 кВ, кількість утворення часткових розрядів в негативній півперіод напруги не змінилася та становить 1, з амплітудним значенням 1,986 В. На позитивній півхвилі прикладеної напруги інтенсивність ЧР становить також 1, але більшого амплітудного значення – - 4.558 В.

Порівнюючи інтенсивність часткових розрядів для зволоженого та сухого зразку у позивний півперіод прикладеної напруги бачимо, що кількість ЧР практично однакова – 2 та 1 відповідно. На мою думку, це пояснюється тим, що

амплітудне значення прикладеної до міжелектроного проміжку напруги дещо недостатнє, для того, щоб побачити повну картину відмінності утворення часткових розрядів в сухому та зволоженому зразку ізоляції.

Підведемо підсумок, що отримані осцилограми дослідження наочно демонструють різницю інтенсивності та характеристик часткових розрядів при напрузі змінного та постійного струму зволоженого та сухого зразків ізоляції при напрузі одного номіналу.

3.4. Висновки по розділу 3

1. Було розглянуто тематичні роботи, в яких запропоновані методи виявлення часткових розрядів, а також проаналізовано істинність методу їх дослідження. Обрана трьох-ємнісна схема заміщення діелектрика з газовим включенням для моделювання часткових розрядів згідно [9,20,22,29-31] призначення для дослідження ЧР при напрузі змінного струму. Удосконаливши схему з додаванням опору витоку діелектрика та спеальним заданням функції джерела напруги стало можливим дослідження ЧР при постійній напрузі.
2. Дослідження часткових розрядів проводились для двох можливих варіантів постійної напруги – задання функціонального джерела напруги амплітудним значенням ідеальної постійної напруги у першому випадку та синусоїдальною напругою з використанням однопівперіодного випрямляча у другому.
3. У першому випадку результати дослідження показали, що із збільшенням значення опору витоку від 340 МОм (опір зволоженого зразку електротехнічного картону) до 90000 МОм (опір сухого зразку електротехнічного картону) інтенсивність часткових розрядів зменшується від 68 до повної відсутності часткових розрядів.
4. У другому випадку результати дослідження показали, що із збільшенням опору витоку від 340 МОм до 90000 МОм інтенсивність

часткових розрядів також зменшується як і у першому випадку від 55 до 3. Час пробою повітряного включення для випадку 1 становить мікросекунди, а для випадку 2 у 10^3 разів більший (мілісекунди).

5. Випрямлена напруга, що прикладена до об'єкту дослідження із більшенням опору витоку приймає більш лінійних характер;
6. Було проведено математичне моделювання часткових розрядів при напрузі змінного струму гідно [9]. Було виявлено деяку відмінність результатів, отриманих теоретичним шляхом, та за допомогою математичного моделювання. Як показало порівняння, результати збігаються лише при високих значеннях опору, що можна вважати недоліком трьох-емісійної схеми заміщення.
7. Було проведено фізичне моделювання часткових розрядів при напрузі постійного струму для зразків зволоженого та сухого електротехнічного картону за допомогою спеціально створеного лабораторного стенду на кафедрі Теоретичної електротехніки. Результати показали, що кількість утворених часткових розрядів та амплітуди імпульсів ЧР у зразку зволоженого електротехнічного картону мають більші значення ніж у сухому зразку.
8. Було проведено фізичне моделювання часткових розрядів при напрузі змінного струму для тих самих зразків. Результати дослідження показали, що у кожний півперіод прикладеної напруги, а також амплітуди імпульсів часткових розрядів мають незначні відмінності при різній зволоженості ізоляції, а їх закономірне утворення демонструє ефект полярності.
9. Порівнюючи інтенсивність часткових розрядів для зволоженого та сухого зразку у позитивний півперіод прикладеної змінної напруги бачимо, що кількість ЧР практично однакова – 2 та 1 відповідно, пояснюється тим, що амплітудного значення прикладеного до міжелектроного проміжку напруги недостатньо для наглядності кривої коливання утворення часткових розрядів.

10.Порівняння отриманих результатів при напрузі змінного та постійного струму показали, що кількість часткових розрядів та їх характеристики для зразків різного ступеню зволоженості демонструють суттєву відмінність параметрів.

Габарити – мається на увазі затрати на перевезення обладнання для діагностики ВВ обладнання.

Змінні витрати – Можливість легкої модернізації даної установки, оскільки вона не являється модульною конструкцією (окремі прилади являються складовими установки, де є можливість заміни існуючих або додавання нових для удосконалення можливостей даної схеми)

Цінова гнучкість – не залежить від деталей окремих виробників, тому із підняттям цін є можливість використовувати більш дешеве обладнання (не заводський аналог-замінник), для економії, не втрачаючи ККД роботи самої схеми.

Строк служби обладнання в даному випадку як: слабкий показник – 10 років; нейтральний – 20 років; сильний показник – більше 25 років. Для власного проекту, дана установка використовує досить старе обладнання із строком служби близько 30 років, при цьому характеристики виміювань і їх якість не зменшують ККД роботи схеми. Оскільки кожна з установок являється старою, то і власне середній строк служби усієї установки можна вважати аналогічним. У випадку Конкурента 1-3, дані установки являються на половину модульними, де кожний з агрегатів зроблений для спільної роботи один з одним. Тому із заміною одної із компонентів схеми через більш швидке старіння чи аварію призведе до зменшення зносостійкості комплексного обладнання, а відповідно і зменшення строку служби.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Проведемо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару). Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових:

Таблиця 8. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Детекція часткових розрядів високовольтного обладнання	Вимірювання характеристик часткових розрядів за допомогою портативних електродів, з'єднаних до основи установки провідниками достатньої довжини для більшої зручності детекції у складнодоступних місцях промислових чи енергетичних об'єктів.	ГОСТ 20074-83	Дані стандарти як технологія виготовлення установки доступні усім і є одним з головних чинників вступу обладнання даного типу на ринок України
		Вимірювання характеристик часткових розрядів за допомогою стаціонарних електродів, як вимірювальної камери, для дослідження стану ізоляційних матеріалів у лабораторних умовах, що забезпечує більшу надійність та безпеку дослідження.	IEC 60270:2000	
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: ГОСТ 20074-83 та IEC 60270:2000				

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Було проведення визначення можливостей, що можна використати під час ринкового впровадження проекту та ринкових загроз, які можуть перешкоджати реалізації даного проекту.

4.3.1. Аналіз попиту як наявність попиту, обсяг, динаміку ринку

Таблиця 9. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продажу, грн/ум.од	30% основного ринку України
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнація ринку
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	(Технологічних бар'єрів) немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ГОСТ 20074-83; ІЕС 60270:2000
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	13%

4.3.2. Потенційні групи клієнтів, їх характеристики, орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи

Таблиця 10. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Необхідність детекції часткових розрядів у високовольтному обладнанні, визначення їх параметрів та характеристик	Компанії виготовлення високовольтного обладнання, які пропонують послуги монтажу, ремонту та діагностики стану ізоляції обладнання	1. Економічність протиставляючи необхідності отримання повного пакету послуг	1. Відсутність нанесення шкоди при діагностиці обладнання (щадяща діагностика)
			2. Отримання повного пакету послуг незалежно від цінової політики	2. Можливість комплексної діагностики
			3. Цільове використання	3. Широкий спектр досліджуваних параметрів
			4. Термін отримання обладнання після його купівлі з надійною його поставкою	4. Мобільність 5. Відношення ціна = якість 6. Експлуатація в будь-яких умовах
2.	Дослідження характеристик та параметрів часткових розрядів	Приватні чи державі наукові лабораторії, що займаються виготовленням чи дослідженням компонент високовольтного обладнання	1. Економічність протиставляючи необхідності отримання повного пакету послуг з урахуванням можливості самостійного удосконалення установки чи її окремих складових	1. Широкий спектр досліджуваних параметрів
			2. Термін отримання обладнання після його купівлі з надійною його поставкою	2. Відсутність нанесення шкоди при діагностиці обладнання
			3. Незмінне значення похибки вимірювань, незалежно від строку служби обладнання	3. Зручність отримання або виведення результатів дослідження

4.3.3. Аналіз ринкового середовища

Таблиця 11. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Установка, компонентами якої являється застаріле обладнання, оскільки вітчизняні постачальники працюють на старих технологіях	Виготовлення приладів невідповідної якості	Пошук на ринку аналогів-замінників з ідентичними або схожими параметрами
2.	Розробка обладнання з новітньою технологією	Швидка та якісніша оцінка параметрів ширшого спектру	Удосконалення властивостей/компонент обладнання з незначним ціновим зростанням, але меншим від ціни конкурентів
3.	Маркетинговий ризик	Неефективний підбір відповідних маркетингових стратегій пропагування та впровадження установки	Пошук постачальників з більш низькими цінами
4.	Непередбачувані зміни вартості основних компонентів обладнання	Ріст витрат, зниження КСП*	Вихід на іноземний ринок
5.	Зміна ринкових обставин як девальвація та інфляція; політичних обставин як прийняття закону про зобов'язання використовувати лише вітчизняне обладнання	Різка зміна курсу долара/євро чи іншої конкурентної валюти;	Знаходження постачальників вітчизняного обладнання
6.	Припинення фінансування Європою зеленого тарифу	Зменшення попиту на обладнання діагностики високовольтних установок	

Таблиця 12. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Підвищення КСП у зв'язку з появою Європейських інвесторів	Збільшення попиту на ринку	Інтенсивна комунікація з потенційними клієнтами
2.	Бурхливий розвиток зеленої енергетики		Моніторинг ринку та захоплення потенційних клієнтів
3.	Створення іноземними компаніями наукових лабораторій		Моніторинг наявності відповідних грантів та проектів
4.	Створення національного прозорого фонду досліджень		Інтенсифікація збутових зусиль в державному секторі

5.	Законодавче обмеження щодо купівлі іноземних розробок за наявності вітчизняних аналогів		
----	---	--	--

4.3.4. Аналіз пропозиції: визначення загальних рис конкуренції на ринку

Таблиця 13. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Монополістична конкуренція	Відносно велика кількість невеликих виробників пропонують схоже, але не ідентичне обладнання	Створення установки, яка буде придатна для більш широкого спектру досліджень Зниження ціни не меншу 110% від собівартості обладнання
2. Локальний	Обладнання схожого типу зустрічається тільки на ринку України (більш розвинені країни використовують більш розвинені технології)	Орієнтація на місцевих клієнтів
3. Електротехнічна промисловість	Дана установка призначена тільки для діагностики стану високовольтного електротехнічного обладнання, або обладнання, що має характерні ознаки	Використання прямого маркетингу
4. Видова конкуренція	Продукція має одне й те саме призначення, але існують суттєві відмінності у параметрах	Розвивати фактори КСП орієнтовані на вітчизняного виробника
5. Цінова	Вигідніші умови реалізації за рахунок маніпуляцій з вартістю комплектуючого обладнання. Наявне незначне збільшення вартості установки за рахунок використання більш якісного, на думку споживача, комплектуючого обладнання	Використати фактор низьких цін у просуванні на ринку

4.3.5. Детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера)

Таблиця 14. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	BAUR PD-TaD 60, OWTS M28, CPDA-15	На даний момент немає	Високі витрати на покриття, унікальність продажу, стратегічна значимість	Цінова гнучкість	Ціна та прилади
Висновки:	Розвиток КСП як: - цінова гнучкість - наявність сертифікатів - змінні витрати - контроль якості - габарити	-	Підтримка довгострокових відносин	Підтримка цінової КСП	Підтримка цінової КСП

Висновки

1. Беручи до уваги конкурентноспроможність на ринку як цінова гнучкість, наявність сертифікатів, змінні витрати, контроль якості та габарити компанія має непогану можливість існування на ринку.
2. Для того щоб конкурентноспроможним на ринку необхідно інтенсивна комунікація з потенційними клієнтами, постійний моніторинг ринку та захоплення потенційних клієнтів, моніторинг наявності відповідних грантів та проектів, а також шукати шляхи інтенсивного збуту в державному секторі

4.3.6. Визначення та обґрунтування переліку факторів конкурентоспроможності

Таблиця 15. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
	Цінова гнучкість	Не залежить від деталей окремих виробників, тому із підняттям цін є можливість використовувати більш дешево обладнання (не заводський аналог-замінник), для економії, не втрачаючи ККД роботи самої схеми

	Наявність сертифікатів	Покупці вважають за краще купувати саме ту продукцію, яка володіє документальним підтвердженням якості, а таким документом є сертифікат. Таким чином наявність сертифікату збільшує конкурентоспроможність та попит на ринку.
	Змінні витрати	Можливість легкої модернізації даної установки, оскільки вона не являється модульною конструкцією (окремі прилади являються складовими установки, де є можливість заміни існуючих або додавання нових для удосконалення можливостей даної схеми)
	Контроль якості	За рахунок контролю якості, дана установка відповідає конкретним вимогам замовників (покупців) і є надійною, задовільною і стійкою у фінансовому відношенні.
	Строк служби	Установка має можливість заміни будь-якої компоненти на нову, без врахування середньої зносостійкості обладнання, за рахунок її модульності. Таким чином із заміною однієї із компонент на нову чи більш нову б/у строк служби збільшуватиметься.
	Габарити	Дана установка являється малогабаритною, тому витрати на її перевезення в порівнянні з габаритним обладнанням будуть економічніші.
	Відповідність ГОСТ 20074-83 та ІЕС 60270:2000	

4.3.7. Аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

Таблиця 16. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Цінова гнучкість			В	О,С				
2.	Наявність сертифікатів		С	О	В				
3.	Змінні витрати			В,О	С				
4.	Контроль якості				В,О,С				
5.	Строк служби			О,С	В				
6.	Габарити				В		О,С		
7.	Відповідність ГОСТ 20074-83 та ІЕС 60270:2000			С	О		В		

В – BAUR PD-TaD 60; О – OWTS M28; С – CPDA-15

4.3.8. SWOT-аналіз

Таблиця 17. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Цінова гнучкість - Наявність сертифікатів - Змінні витрати - Контроль якості - Строк служби 	<p>Слабкі сторони:</p> <p>В перспективі очікується обмеження попиту в державному/недержавному секторі</p>
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Підвищення КСП у зв'язку з появою Європейських інвесторів - Бурхливий розвиток зеленої енергетики - Створення іноземними компаніями наукових лабораторій - Створення національного прозорого фонду - Законодавче обмеження щодо купівлі іноземних розробок за наявності вітчизняних аналогів 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Установка, компонентами якої являється застаріле обладнання - Обладнання з новітньою технологією - Маркетинговий ризик - Непередбачувані зміни вартості основних компонентів обладнання - Зміна ринкових або політичних обставин - Припинення фінансування Європою зеленого тарифу

4.3.9. Альтернативи ринкової поведінки

Таблиця 18. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Зосередження на держсекторі, залучення державних грантів	Середня	Протягом року
2	Вихід на приватні лабораторії із пропозицією спільного виробництва за рахунок їх інвестицій	Низька, оскільки, скоріш за все мають іноземних постачальників	Протягом півроку
3	Пошук інвестора для виробництва та реалізації за кордоном	Низька	Протягом року
4	Вихід на сегмент вітчизняних компаній з виготовлення обладнання (СП) або продаж їм ідеї приладу (потрібно запатентувати)	Середня	Протягом 2,5-3 років (розгляд заявок на патентування займає 1,5-2 роки).

Як результат була обрана альтернатива 1 – зосередження на держсектори, залучення державних грантів, через середню ймовірність отримання ресурсів з строком реалізації протягом року.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

4.4.1. Визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів

Таблиця 19. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1.	Зосередження на держсектори, залучення державних грантів	Середня	З урахуванням розвитку наукових лабораторій очікується зростання попиту	Більшість існуючих на ринку конкурентів не відповідають необхідним характеристикам для проведення досліджень, тобто зосереджені лише на виявленні наявності дефектів у обладнанні	Оскільки дана установка володіє більшістю необхідних характеристик, які потребують дослідні установки, вхід до сегменту очікується середнім (присутня можливість того, що якщо лабораторії будуть не суто державними, вони матимуть можливість обрати обладнання виробника-лідера)
Які цільові групи обрано: Цільові групи вчених, що працюють у різних науково-дослідних підрозділах					

4.4.2. Формування базової стратегії розвитку

Таблиця 20. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
	Зосередження на держсектори, залучення державних грантів	Концентрований маркетинг	Низькі витрати на виготовлення, змінні витрати, а також витрати на експлуатацію і контроль якості	Лідерство за витратами

4.4.3. Вибір стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 211. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Даний проект є першопрохідцем на ринку, де існують схожі проекти, але з деякими відмінними властивостями	Забираючи існуючих у конкурентів споживачів слід очікувати, що за тобою крок у крок буде йти постійне порівняння компаній, якості товару та ціни. Відповідно, у моменти, коли та чи інша компанія буде у чомусь програвати, споживачі будуть переходити від одної компанії до іншої. Пошук нових споживачів займе досить тривалий час, але знайшовши їх існуватиме деяка захищеність по відношенню до рентабельності	Ні. Оскільки по відношенню до такої установки недоцільно використовувати слово копіювати. Якщо деякі характеристики обладнання будуть обмежуватись наявними параметрами чи характеристиками її компонент, і вони будуть мати однакові характеристики, це не можна вважати копіюванням.	В перший період існування маленької компанії важко застосувати стратегію лідера, тим більш не маючи достатнього досвіду існування на ринку і відповідно ресурсів. В такому випадку краще піти в вузьку спеціалізацію, зайняти декілька сегментів ринку та базуватися на удосконаленні унікальних характеристик продукції. (стратегія нішера).

		компанії. Таким чином для маленької компанії краще обрати другий варіант, але і не випускати із огляду перший.		
--	--	--	--	--

4.4.4. Розробка стратегії позиціонування, формування ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 22. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Відсутність нанесення шкоди при діагностиці обладнання (щадящая диагностика)	Лідерство по витримці	Низькі витрати на виготовлення, змінні витрати, а також витрати на експлуатацію і контроль якості	Економність
2	Можливість комплексної діагностики			Простота в експлуатації
3	Широкий спектр досліджуваних параметрів			
4	Мобільність			Вітчизняне (виходячи на державні лабораторії, де основним пріоритетом є вітчизняне обладнання)
5	Експлуатація в будь-яких умовах			
6	Зручність отримання або виведення результатів дослідження			

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

4.5.1. Формування *маркетингової концепції товару*. Підсумок результатів попереднього аналізу конкурентоспроможності товару

Таблиця 23. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ n/n	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	1. Необхідність детекції часткових розрядів у високовольтному обладнанні, визначення їх параметрів та характеристик 2. Дослідження характеристик та параметрів часткових розрядів	- Цінова гнучкість - Наявність сертифікатів - Змінні витрати - Контроль якості - Строк служби	Низькі витрати на виготовлення, змінні витрати, а також витрати на експлуатацію і контроль якості.

4.5.2. Розробка трирівневої маркетингової моделі товару

Таблиця 24. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Цінова гнучкість, наявність сертифікатів, змінні витрати, контроль якості, строк служби, висока чутливість приладу та мінімальні похибки (для лабораторій), відповідність стандартам		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Габарити		Пр/Тх
	2. Вага		Тх
	3. Кількість одиниць		Вр
	Якість: ГОСТ 20074-83; ІЕС 60270:2000		
	Пакування: Ящик пластмасовий у більбашковому поліетилені (зовнішнє), бульбашкова поліетиленова плівка, спеціальний скоч для кріплення мілких деталей (внутрішня)		
III. Товар із підкріпленням	Марка: PD-D 8/220		
	Назва організації «PD-Detec (PD-D)»		
	Назва товару «PD-D 8/220»		
III. Товар із підкріпленням	До продажу		
	Після продажу		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Патент на корисну модель			

4.5.3. Визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар

Таблиця 25. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Товари замітники відсутні	110 тис. грн.	20 тис. грн.	80 тис. грн.

4.5.4. Визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення

Таблиця 26. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Наявний закупівельний центр, колегіальне прийняття рішення	Проведення переговорів, укладання контакту, транспортування, перевірка якості транспортування та роботи обладнання при його експлуатації	Нульовий рівень, прямий збут	Власний торговий представник, або власний відділ збуту

4.5.5. Розробка концепції маркетингових комунікацій

Таблиця 272. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Прийняття професіонального та раціонального рішення	Галузеві виставки, електронні торговельні майданчики, галузеві видання	-	Переконати у цілеспрямованості придбання економічного вітчизняного приладу	Дати свій слоган, наприклад «Не все те неякісне, що дешеве»

4.6. Висновки до розділу 4

1. Метою стартап-проекту було формування іноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатності оцінювати ринкові перспективи комерціалізації науково-технічних розробок розробленої у розділі 3 магістерської дисертації.

2. Для досягнення цієї мети було:

1) описано ідею проекту;

2) проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідкю проекту (технології створення товару);

3) визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

4) розробка ринкової стратегії проекту;

5) розробка маркетингової програми стартап-проекту.

3. Результати дослідження показали, що дана установка має середні можливості існування на ринку, з рентабельністю близько 10%. Оскільки в даний час відбувається інтенсивний розвиток наукових спеціалізованих лабораторій, а також лабораторій при компаніях-розробниках ізоляційних матеріалів, на ринку є перспектива існування даного товару. Для ринкової реалізації була обрана альтернатива лідерства по витратам.

ВИСНОВКИ

1. Розглянулась актуальність ліній електропередач постійного струму для різних країн світу, зокрема і Європи окремо. Перші кроки до будівництва світової супергريد були зроблені ще у 1882 році Німеччиною. І на даний час, згідно списку існуючих проектів ліній передачі постійного струму, західна Європа вважається основоположником даного глобального проекту. Процес передачі електричної енергії по лініям постійного струму носить принципово інший характер ніж при змінному струмі, тому що в ній відсутні хвильові процеси. На схемі це обумовлюється відсутністю елементів, що моделюють негативні процеси передачі енергії на змінному струмі. Пропускна можливість лінії змінного струму, визначається електромагнітними властивостями, залежить від її довжини та зменшується із збільшеннями останнього, то в лінії постійного струму така можливість відсутня, оскільки відсутній повздовжній індуктивний опір лінії та ємнісна поперечна провідність (оскільки частота рівна нулю). Це і пояснює можливість передачі великої кількості енергії на далекі відстані.

Передача постійного струму відбувається за уніполярною схемою для передачі малої кількості потужності на відносно невеликі дистанції та біполярною схемою, якщо необхідно передавати значні потужності на великі дистанції. Базові складові таких схем – це конверторні та інверторні пункти. Для деякого дослідження була обрана уніполярна схема передачі постійного струму для дослідження відмінностей роботи схеми при різних її типах заземлення: з наявним другим металевим провідником, без наявного металевого провідника та заземленою середньою точкою. Як показало дослідження, передача постійного струму а також робота схеми у нормальному режимі не залежить від виду її заземлення, та обирається згідно конструктивних, технологічних та інших міркувань.

2. Було дослідження механізм утворення часткових розрядів при напрузі змінного струму у трьох-ємнісній схемі заміщення діелектрика з газовим включенням. Часткові розряди у такій схемі виникатимуть у перший півперіод прикладеної напруги до тих пір, поки напруга джерела не пройде максимум свого значення, після чого ЧР утворюватимуться у другому півперіоді напруги. Було дослідження механізм утворення часткових розрядів при напрузі постійного струму тієї ж схеми заміщення. Суттєвою відмінністю між розглянутими схемами у тому, що на відміну від схеми заміщення при змінній напрузі, при постійній розрядження та зарядження ємності газового включення визначається не тільки ємностями, але й опорами витоку діелектрика і включення. Якщо прийняти умови дослідження кількості утворення часткових розрядів рівними для постійної та змінної напруги (наприклад $U_0 = 2,5U_{\text{ЧР}}$), то кількість ЧР при постійній напрузі складатиме $n_- = 0.1 \text{ с}^{-1}$, а змінній – $n_- = 800 \text{ с}^{-1}$, що показує різницю у нанесенні руйнівного впливу ізоляції високовольтного обладнання.

3. За основу дослідження була обрана трьох-ємнісна схема заміщення діелектрика з газовим включенням, що являється традиційним підходом у моделюванні часткових розрядів. Дана схема використовується для моделювання ЧР при змінній напрузі. Тому для моделювання на постійному струмі дана модель була удосконалена додаванням у неї опорів витоку газового включення та діелектрика. Дослідження часткових розрядів проводились для двох можливих варіантів постійної напруги – задання функціонального джерела напруги амплітудним значенням ідеальної постійної напруги у першому випадку та синусоїдальною напругою з використанням однопівперіодного випрямляча (поєднання елементів D_1 , R_4 , C_4 у схемі) у другому. Для ідеальної постійної напруги результати дослідження показали, що тривалість фронту розряду при зволоженій та сухій ізоляції має суттєві відмінності. Час пробією першого ЧР складає: 84.96 мкс і наступні з $\Delta t \approx 144.8 \text{ мкс}$ для $R_2 = 340 \text{ МОм}$; 228.255 мкс і $\Delta t \approx 385.87 \text{ мкс}$ для $R_2 = 900 \text{ МОм}$; 2.713 мс і $\Delta t \approx 4.465 \text{ мс}$ для $R_2 = 9000 \text{ МОм}$. При

$R_2 = 90000$ МОм на проміжку часу $t = (10 \dots 100)$ мкс спостерігаються коливальні процеси, напруга яких не перевищує значення пробивної напруги і рівна 429.735 В, а отже можна зробити висновки, що дані процеси не являються частковими розрядами і в сухій ізоляції вони повністю відсутні. Інтенсивність часткових розрядів у зволоженій ізоляції ($R_2 = 340$ МОм) становить 68, а із зменшенням вологості зразку має значення 26, 2 та 0. Слід зазначити, що значення проміжних опорів вибиралося самостійно, оскільки дослідити зразки різного ступеню зволоженості досить складно.

Результати дослідження моделювання на конвертованому струмі показали, що час пробою першого часткового розряду складає: 1.078 мс і наступні з $\Delta t \approx 0.312$ мкс для $R_5 = 340$ МОм; 1.529 мкс і $\Delta t \approx 0.42$ мкс для $R_5 = 900$ МОм; 1.774 мс і $\Delta t \approx 0.77$ мс для $R_5 = 9000$ МОм; 1.814 мс і $\Delta t \approx 0.817$ мс для $R_5 = 90000$ МОм. Далі напруга знову збільшується до значення 780.507 В при $t = 6.249$ мс, не перевищуючи напругу пробою і зменшується до значення 428.235 В та залишається незмінною на усьому проміжку часу. Також згідно отриманим осцилограмам досліджень, конвертована напруга, що прикладається безпосередньо до ізоляції з газовим включенням із збільшенням значення опору витoku діелектрика приймає більш лінійний характер. Для порівняння було обрано два методи дослідження часткових розрядів: математичний та схемотехнічний. бачимо, що результати теоретичних розрахунків а схематичного моделювання збігаються тільки при високих значеннях опору. При зниженні опору похибка суттєво зростає ($\approx 5.88\%$ при ідеальному постійному струмі; $\approx 30.91\%$ при конвертованому). Це можна вважати ще одним із знайдених незначних недоліків трьох-ємнісної схеми заміщення діелектрика з газовою порожниною при частковому розряді. Також можливою причиною отримання більш суттєвої похибки вимірювання при конвертованому струмі пояснюється тим, що даний математичний розрахунок не враховує додаткових параметрів трьох-ємнісної схеми, що пояснювали б дещо коливальний характер прикладеної

напруги. У цьому випадку можливо необхідно було б додати у коло конвертора додатковий активний опір значної величини.

Для фізичного моделювання часткових розрядів на кафедрі Теоретичної електротехніки був зібраний спеціальний стенд для моделювання ЧР при змінному та постійному струмі. Об'єктом фізичного моделювання є міжелектродний проміжок, що складається з двох співвісних циліндричних електродів та електротехнічного картону. Як показали результати отриманих осцилограм у сухому зразку ізоляції при напрузі 5,2 кВ утворюється 1 імпульс ЧР амплітудою 0,876 В, а у зволоженій при 4,9 кВ – 4 імпульси амплітудою 2,512 В. При напрузі проміжку 7,5 кВ сухого зразку, інтенсивність ЧР становить 2 з максимальним значенням імпульсів 2,22 В, а у зволоженому зразку кількість ЧР складає 8 амплітуди ЧР 1,276 В. Можна зробити висновки, що у сухому зразку із збільшенням напруги у 1,442 рази кількість часткових розрядів збільшується у 2 рази, а амплітуда 2,534 рази. У вологому зразку при збільшенні напруги у 1,53 рази, інтенсивність зростає у 2 рази та амплітуда – у 0,508 рази, тобто зменшується. При більшій напрузі у зволоженому зразку утворюється більша кількість ЧР меншої амплітуди.

Додаток А

Великі та середні зв'язки HVDC у Європі

№ п/п	Назва пункту	Конверторна станція 1	Конверторна станція 2	Протяжність, км	Напруга, кВ	Потужність, МВт	Рік початку/кінця проекту	Вид схеми
1	Лінія електропередач Мішбах – Мюнхен, Німеччина	Мішбах	Мюнхен	58	2	0,0025	1882	Одна машина
2	Річка Горзенте – Генуя, Італія	Річка Горзенте	Генуя	-	6	-	1889	Тюрі
3	Ла Шо-де-Фондс, Швейцарія	-	-	-	14	-	1897	
4	Сен-Морис – Лозанна, Швейцарія	Сен-Морис	Лозанна	-	22	3,7	1899	
5	Ліон – Мутьєр, Франція	Ліон	Мутьєр	200	75	30	1906	
6	Вільсден – Айронбридж, Англія	Вільсден	Айронбридж	-	100	-	1910	
7	Шамбері, Франція	-	-	-	150	-	1925	
8	Цюрих – Веттенген, Швейцарія	Веттенген	Цюрих	20	50	0,5	1939	Мерк
9	Шарлоттенбург – Моабіт, Німеччина	Берлін – Моабіт	Берлін – Шарлоттенбург	4,6	100	14	1942	
10	Лере – Місбург, Німеччина	Лере	Ганновер/Місбург	-	80	16	1944	
11	Проект Ельбе, Німеччина	Вокерод	Берлін, Марієнфельде	115	200	60	1945	
12	Трольхттан – Меруд, Швеція	Трольхттан	Меруд	50	45	6,5	1946	
13	Готланд – 1, Швеція	Вестервік	Єнбй	98	200	20	1954	
14	Конті-Скан	Вестер Хассінг, Данія	Стенкулен, Швеція	176	250	250	1965	
15	SACO I (Італія – Корсія – Сардинія)	Суверенто, Італія (до 1992 Італія - Сан Далмажіо)	Лучіана, Франція; Кондрогіанос, Італія	483	200	200	1965	
16	Кінгснорт	Кінгснорт	Лондон – Бенінгтон	85	266	320	1975	
17	Кінгснорт	Кінгснорт	Лондон – Вільсден	111	266	320	1975	
18	Скагаракк 1+2	Т'ель, Данія	Крістіансанд, Норвегія	230	250	500	1977	Тюрі
19	Готланд – 2, Швеція	Вастервік	Ігн	99,5	150	130	1983	

№ п/п	Назва пункту	Конверторна станція 1	Конверторна станція 2	Протяжність, км	Напруга, кВ	Потужність, МВт	Рік початку/кінця проекту	Вид схеми
20	Взаємозв'язок Франція – Англія	Мандарини, Франція	Селіндж, Англія	72	270	2000	1986	
21	Готланд – 3, Швеція	Вастервік	Ігн	98	150	130	1987	
22	Конті-Скан 2	Вестер, Хассінг, Данія	Ліндом, Швеція	147	285	300	1988	
23	Фенно-Скан	Раума, Фінляндія	Даннебо, Швеція	233	400	500	1989	
24	SACO1 2	Суверенто, Італія (до 1992 Італія - Сан Дальмажіо)	Лучіана, Франція; Кондрогіанос, Італія	422	200	300	1992	
25	Скагаракк 3	Т'ель, Данія	Крістіансанд, Норвегія	230	350	440	1993	
26	Балтик Кабель	Любек-Герренвик, Німеччина	Крусенберг, Швеція	262	450	600	1994	
27	Контек	Б'сваков, Данія	Бентвіх, Німеччина	170	400	600	1996	IGBT
28	Хельскен – Гренгесберг, Швеція	Хельскен	Гренгесберг	10	180	3	1997	
29	Візбі – Наз, Швеція	Наз	Візбі	70	80	50	1999	Тюрі
30	ШвеПоль	Вежбенчін, Польща	Стане, Швеція	245	450	600	2000	
31	Тьереборг	Тьереборг/Вузол, Данія	Тьереборг/Підстанція	4.3	9	7	2000	IGBT
32	Італія – Греція	Арахтос, Греція	Галатіна, Італія	310	400	500	2001	Тюрі
33	Мойл	Аухенхорш, Велика Британія	Балікронан Мор, Велика Британія – Північна Ірландія	63,5	250	250	2001	
34	HVDC Трол, Норвегія	Кольснес	Офшорна платформа Трол А	70	60	80	2004	IGBT
35	Естлінк	Еспо, Фінляндія	Харку, Естонія	105	150	350	2006	
36	НорНед	Емсхавен, Нідерланди	Феда, Норвегія	580	450	700	2008	Тюрі
37	БрітНед	Грейн, Велика Британія	Маасвлате, Нідерланди	245	450	1000	2010	
38	СторБельт, Данія	Фрауд	Херслев	56	400	600	2010	
39	Комета, Іспанія	Морведре	Санта Понса	247	250	400	2011	
40	Фенно-Скан 2	Раума, Фінляндія	Фіннболе, Швеція	303	500	800	2011	
41	САПЕІ, Італія	Латіна	Ф'юме Санто	435	500	1000	2011	IGBT
42	Валхолл HVDC, Норвегія	Ліста	Валхолл, офшорна платформа	292	150	78	2011	
43	БорВін 1, Німеччина	Диле	БорВін Альфа платформа	200	±150	400	2012	
44	Східно-Західний міжзв'язок	Вудленд, Ірландія	Шотон, Уельс, Велика Британія	130	±200	500	2012	Тюрі
45	Фенно-Скан 1 Удосконалений	Раума, Фінляндія	Фіннбол, Швеція	233	400	500	2013	

№ п/п	Назва пункту	Конверторна станція 1	Конверторна станція 2	Протяжність, км	Напруга, кВ	Потужність, МВт	Рік початку/кінця проекту	Вид схеми
46	Естлінк 2	Антила, Фінляндія	Пюссі, Естонія	171	450	650	2014	
47	АЛ – Лінк	Наанталі, Фінляндія	Йтербі, Аланд	158	80	100	2015	
48	БорВін 2, Німеччина	Диле	БорВін Бета платформа	200	±300	800	2015	IGBT
49	ДолВін 1, Німеччина	Хіде	ДолВін Альфа платформа	165	±320	800	2015	
50	ХелВін 1, Німеччина	Бйотель	ХелВін Альфа платформа	130	±250	576	2015	
51	ХелВін 2, Німеччина	Бйотель	ХелВін Бета платформа	130	±320	690	2015	
52	ИНЕЛФЕ	Байшес, Франція	Санта Ллоджея, Іспанія	64	±320	2000	2015	
53	ЛитПол Лінк HVDC 2B2	Алитус, Литва	Ельк, Польща	160	70	500	2015	Тюрі
54	НордБалт	Нібро, Швеція	Клапеда, Литва	450	300	700	2015	IGBT
55	Скагаракк 4	Т'ель, Данія	Крістіансанд, Норвегія	244	500	700	2015	
56	СільВін 1, Німеччина	Бйотель	СільВін Альфа платформа	205	±320	864	2015	
57	Тролл А 3&4, Норвегія	Колнес	Тролл А 3&4 платформа	70	66	100	2015	
58	ДолВін 2, Німеччина	Хіде	ДолВін Бета платформа	135	±320	900	2016	
59	СідВостлайкен, Швеція	Баркерід	Хурва	260	±300	2x720	2016	
60	ДолВін 3, Німеччина	Хіде	ДолВін Гамма платформа	160	±320	900	2017	
61	HVDC МОН.ІТА Проект	Чпагатті, Італія	Ластва Грбальска, Монтенегро	415	±500	1000	2017	Тюрі
62	Західний HVDC Зв'язок, Велика Британія	Хантерстон	Флантшайн Брідж	422	600	2200	2017-18	Тюрі
63	Катнес Морей HVDC, Велика Британія	Спітл	Блеккіллок	200	320	1200	2018	IGBT
64	БорВін 3, Німеччина	Диле	БорВін Гамма платформа	200	±320	900	2019	
65	Кобракабель	Ендрап віа Фан, Данія	Емсхавен, Нідерланди	325	400	700	2019	-
66	ЕлекЛінк	Мандарини, Франція	Селліндж, Велика Британія	70	320	1000	2019	-
67	Франція-Італія через туннель Фрежюс-роуд	Гранд-Іль, Франція	Піоссаско, Італія	190	±320	2x600	2019	IGBT
68	Зв'язок Немо	Брюгге, Бельгія	Енергетичний парк Річборо, Велика Британія	140	400	1000	2019	
69	АЛЕГро	Візе, Бельгія	Аухен, Німеччина	100	320	1000	2019-20	
70	ІФА 2	Турбе, Нормандія, Франція	Хемпшир, Піллінг, Велика Британія	240	400	1000	2020	
71	НОРД.ЛІНК	Тонстад, Норвегія	Вільштер, Німеччина	623	525	1400	2020	
72	НСН Лінк	Квілдал, Норвегія	Бліт, Англія	730	515	1400	2020	
73	ФАБ Лінк	Менуель на півострові Шербур, Франція	Ексетер через Олдерні, Велика Британія	-	-	1000/1400	2021	-

№ п/п	Назва пункту	Конверторна станція 1	Конверторна станція 2	Протяж- ність, км	Напруга, кВ	Потуж- ність, МВт	Рік початку/ кінця проекту	Вид схеми
74	Шотландський HVDC зв'язок, Велика Британія	Верхній Керкорд	Біля Стаксіго	345	300	550/600	2021	Тюрі
75	Західні Острови HVDC, Велика Британія	Арніш Поінт біля Сторнвей	Болі	156	320	600	2021	-
76	ЄвроАзіатський міжзв'язок	Ізраїль через Кіпр та Кріт	Аттіка, Греція	1520	500	2000	2022	-
77	Північний Зв'язок	Шимдален, Норвегія	Петерхед, Велика Британія	650	-	1400	2022	-
78	Вікінг Лінк	Ресвінг, Данія	Байкер Фен, Велика Британія	740	-	1000-1400	2021	-
79	ЄвроАфриканський міжзв'язок	Єгипет через Кіпр та Кріт	Аттіка, Греція	1707	500	2000	2021	-
80	Східний HVDC,Зв'язок, Велика Британія	Петерхед	Хоторн	305	400	2000	2024	

ЛІТЕРАТУРА

1. Аввакумов М.В., Голенищев-Кутузов А.В. Исследование частичных разрядов при электрическом пробое модельных изоляторов из электротехнического фарфора/ Проблемы энергетики. – 2003. – №9-10. с. 134-140.
2. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования/ В.П. Вдовико. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
3. Гатауллин А.М., Бадретдинов М.Н., Шмидт С.В., Матухин В.Л. Метод анализа параметров частичных разрядов/ Проблемы энергетики. – 2008. – №11-12. с. 105-112.
4. Гатауллин А.М., Шмидт С.В., Матухин В.Л., Крупнов Б.А. Комплексный метод регистрации параметров частичных разрядов в изоляции электрооборудования. – Проблемы энергетики. – 2010. – №9-10. с. 98-104.
5. ГОСТ 8865-70
6. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследования изоляции кабельных линий. – Н.: Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. с. 200-205.
7. Зотин О. В преддверии возрождения постоянного тока. Часть 1/ Силовая Электроника. – 2013. – №3. с. 4-9.
8. Зотин О. В преддверии возрождения постоянного тока. Часть 2/ Силовая Электроника. – 2013. – №4. с. 76-83.
9. Ларионов В.П. и др. Техника высоких напряжений: Учебник для техникумов/ В.П. Ларионов, В.В. Базукин, Ю.Г. Сергеев; Под ред. В.П. Ларионова – М.: Энергоиздат, 1982. – 296 с., ил.
10. Михайленко, В. В., Піксотов, В. В., Малафійчук, Л. В., Маляр, І. В. Математична модель дванадцятипульсного перетворювача трифазної

напруги з чотирнадцятизонним регулюванням вихідної напруги// Адаптивні системи автоматичного управління: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2015. – Т.2. № 27. – с. 83-87.

11. Пахомов, А. И. Методы и средства диагностики изоляции асинхронных двигателей сельскохозяйственного производства на основе частичных разрядов: автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук: спец. 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве/ А. И. Пахомов. – Краснодар, 2005. – 32 с.
12. Проценко О.Р., Троценко Є.О., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С. Розробка фільтра верхніх частот для стенду дослідження характеристик часткових розрядів// Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2018 (У друці)
13. Проценко О.Р., Троценко Є.О., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С. Стенд для дослідження характеристик часткових розрядів в ізоляції електроустаткування високої напруги// Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2018 (У друці)
14. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: Учебник для вузов/ Ю.П. Рыжов – М.: Издательский дом МЭИ, 2007 – 488 с., ил.
15. Троценко Є.О., Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Олексієнко В.П. Моделювання часткових розрядів при впливі грозових та комутаційних імпульсів напруги// Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2018 (У друці)
16. Троценко Є.О., Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Михалицький В.Л. Дослідження часткових розрядів при впливі напруги

змінного та постійного струму// Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2018 (У друці)

17. Щерба М.А., Малафійчук Л.В., Прилепа Р.Ф. Механизмы взаимодействия электрического поля с проводящими микровключениями в диэлектриках // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2014. – С. 387-389.

LITERATURE

18. Babicheva, A. A. Modeliuvannia probou izoliatsiinoho promizhku iz zadanoiu volt-sekundnoiu kharakterystykoiu [Text] / A. A. Babicheva, O. R. Protsenko, Ye. O. Trotsenko // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv "Suchasni problemy elektroenerhotekhniki ta avtomatyky". – 2016. – pp. 357-359.
19. Clark W. Gellings. A globe spanning super grid/ Clark W. Gellings// IEEE Spectrum. – 2015. –Vol. 52, No. 8. – P. 48-54.
20. Gemant A., Philippoff W. Die Funkenstrecke mit Vorkondensator//Zeitschrift für Technische Physik. 1932. Vol. 13, No. 9. P. 425–430.
21. Gemant, A. Die funkenstrecke mit vorkondensator [Text] / A. Gemant, W. Philippoff // Zeitschrift für technische physik. – 1932. – Vol. 13, No. 9. – P. 425-430.
22. Gulski E. Digital analysis of partial discharges// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2, No. 5. P. 822–837.
23. J. Xiang, Q. Liu, Z.D. Wang. Inception and Breakdown Voltages of Insulating Liquids under DC Stress/ IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE).- 2016. – No. 16558669. – 5 p.

24. Lemke, E. A critical review of partial-discharge models [Text]/ E. Lemke // IEEE Electrical insulation magazine. – 2012. – Vol. 28, No. 6. – P. 11-16
25. P.K. Olsen, F. Mauseth, E. Ildstad. The effect of DC superimposed AC Voltage on Partial Discharges in Dielectric Bounded Cavities/ IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE).- 2014. – No. 7035408. – 4 p.
26. Peter Fairley. DC versus AC: the second war of currents has already begun/ Peter Fairley// IEEE Power & Energy Magazine. – 2012. – Vol. 10, No. 6. P. 103-104.
27. Peter Fairley. The great baltic disconnect [News]/ Peter Fairley// IEEE Spectrum. – 2015. – Vol. 52. – No. 9. – P 11-13.
28. Ramanujam Sarathi, Prathap D. Singh, Michail G. Danikas. Characterization of partial discharges in transformer oil insulation under ac and dc voltage using acoustic emission technique//Journal of Electrical Engineering. – 2007. – Vol. 58, No. 2, P. – 91–97.
29. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Simulation of partial discharges under influence of impulse voltage// Technology audit and production reserves. 2018. Vol. 1, No. 1 (39). P. 36–41.
30. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges// Technology audit and production reserves. 2018. Vol. 2, No. 1 (40). P. 37–44.
31. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Experimental study and modeling of partial discharge detection system // Technology audit and production reserves. 2018. Vol. 4, No. 1 (42). P. 17–22.
32. Trotsenko Ye. Circuit simulation of electrical breakdown in air using Kind's equal-area criterion [Text] / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // Technology audit and production reserves. – 2017. – Vol. 3, No. 1(35). – P. 44-49

33. U. Fromm. Interpretation of Partial Discharges at dc Voltages/ U. Fromm// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 199 Characterization of partial discharges in transformer oil insulation under AC and DC voltage using acoustic emission technique5. - Vol. 2. – No. 5. – P. 761-770.
34. Vassilios G. Agelidis, Georgios D. Demetriades, Nikolas Flourentzou. Recent Advances in High-Voltage Direct-Current Power Transmission Systems// IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – 2006. – P. 206-213.
35. Vdoviko V. P. Chastichnye razriady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniia. Novosibirsk: Nauka, 2007. 155 p.; Galski E. Digital analysis of partial discharges// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2, No. 5. P. 822–837.
36. <http://electricalschool.info/main/elsnabg/619-linii-jelektroperedachi-postojannogo.html>
37. <http://viking-link.com/>
38. [http://www.eirgridgroup.com/customer-and-industry/interconnection/https://en.wikipedia.org/wiki/Skagerrak_\(power_transmission_system\)](http://www.eirgridgroup.com/customer-and-industry/interconnection/https://en.wikipedia.org/wiki/Skagerrak_(power_transmission_system))
39. <http://www.northconnect.no/>
40. <http://www.ptd.siemens.de/artikel0304.html>
41. http://www.statnett.no/en/Projects/NORDLINK/https://en.wikipedia.org/wiki/North_Sea_Link
42. <https://en.wikipedia.org/wiki/Balticconnector>
43. <https://en.wikipedia.org/wiki/BritNed>
44. <https://en.wikipedia.org/wiki/Estlink>
45. https://en.wikipedia.org/wiki/European_super_grid
46. <https://en.wikipedia.org/wiki/Konti%E2%80%93Skan>

47. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_HVDC_projects
48. https://en.wikipedia.org/wiki/LitPol_Link
49. <https://en.wikipedia.org/wiki/NordBalt>
50. <https://en.wikipedia.org/wiki/NorNed>
51. https://en.wikipedia.org/wiki/SuperSmart_Grid
52. <https://en.wikipedia.org/wiki/SwePol>
53. https://en.wikipedia.org/wiki/Viking_Link
54. <https://new.abb.com/systems/hvdc/references/baltic-cable>
55. <https://new.abb.com/systems/hvdc/references/kontek><https://en.wikipedia.org/wiki/Konti%E2%80%93Skan>
56. <https://renews.biz/106040/northconnect-scores-eu-cash/>https://en.wikipedia.org/wiki/Baltic_Cable
57. <https://web.archive.org/web/20120203153301/http://social.csptoday.com/emerging-markets/desertec-and-medgrid-competitive-or-compatible>
58. <https://web.archive.org/web/20120501222122/http://www.ufmsecretariat.org/en/secretary-general-ahmad-masa%E2%80%99deh-speaks-at-medgrid-project-signature/>
59. <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-a-converter-transformer-and-a-power-transformer>
60. <http://www.islesproject.eu/>